

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Příprava vybraných technických podkladů pro automatickou tvarovací linku

Preparation of chosen technical documents for an automatic thermoforming machine

Marek Košek
KSP – TP – B35

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D. – *TU v Liberci*

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jaroslav Šáral - *VYVA PLAST, s. r. o. Turnov*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	57
Počet tabulek	10
Počet příloh	0
Počet obrázků	19

Datum: 25.5.2007

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 – Strojírenství
Student: Marek Košek
Téma práce: Příprava vybraných technických podkladů pro automatickou tvarovací linku

Preparation of chosen technical documents for an automatic thermoforming machine

Číslo BP: KSP-TP-B35
Vedoucí BP: Ing. Aleš Ausperger, Ph.D. – *TU v Liberci*
Konzultant: Ing. Jaroslav Šáral – *VYVA PLAST, s. r. o. Turnov*

Abstrakt:

Cílem bakalářské práce je příprava podkladů pro výrobu prokladu pro elektrické nářadí, konkrétně zpracování teoretického úvodu pro technologii tvarování na automatických tvarovacích strojích, výpočty tepelné bilance a střížné síly pro oddělení výrobku od polotovaru a konstrukční ideový návrh tvarovacího nástroje. Sepsaná teorie dává ucelený obraz o technologii tvarování. Provedené výpočty prokázaly, že výrobek půjde za dodržení stanovených podmínek vyrobit na daném stroji za požadovanou dobu výrobního cyklu pomocí navrženého nástroje.

Abstract:

The aim of this bachelor thesis is a preparation of technical data for production of spacing for an electric appliance, particularly an elaboration of a theoretical introduction for a technology of thermoforming by using an automatic thermoforming machine, a calculation of heat-balancing and cutting force for separation a product from a intermediate product and a constructional idea of a thermoforming tool.

A written theory presents a clear and coherent idea about a technology of thermoforming. Calculations proved that it is possible to make this product according to the prescribed conditions by using this type of machine and during the working time cycle with using proposed tool.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2007

.....
Marek Košek
Karlov 338
468 44 Josefův důl

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Jaroslavu Šáralovi, výkonnému řediteli firmy VYVA PLAST Turnov, že mi umožnil vytvořit tuto bakalářskou práci a věnoval mi svůj čas ke konzultacím mých postupů. Dále pracovníkům konstrukčního oddělení firmy VYVA PLAST Turnov za odborné rady a konzultace. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Aleši Auspergrovi Ph.D. za cenné podněty a připomínky.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
1. Úvod.....	10
2. Teoretická část.....	11
2.1 Tvarování plastů – základní principy	11
2.1.1 Princip tvarování.....	11
2.1.2 Mechanické a pneumatické tvarování.....	12
2.1.2.1 Podtlakové a přetlakové tvarování.....	12
2.1.3 Pozitivní a negativní tvarování	13
2.1.4 Jednorázové a postupné tvarování	14
2.1.5 Tvarovací stroje	16
2.2 Vlastnosti plastů a jejich vliv na tvarování	17
2.2.1 Třecí vlastnosti během tvarování	17
2.2.2 Smrštění termoplastů	17
2.2.3 Chování termoplastů během zahřívání.....	18
2.2.3.1 Vliv tepelného cyklu.....	18
2.2.3.2 Teplotní roztažnost a deformace.....	18
2.2.3.3 Teplotní rámec pro tvarování.....	19
2.2.4 Tažení termoplastů.....	20
2.2.5 Schopnost rozlišení detailů na výrobku	20
2.2.6 Chování termoplastů během ochlazování	21
2.3 Nástroje pro tvarování.....	23
2.3.1 Základní principy	23
2.3.1.1 Velikost dávky	23
2.3.1.2 Geometrie výrobku	23
2.3.1.3 Rozměrová stabilita	23
2.3.1.4 Jakost povrchu	24
2.3.1.5 Smrštění a deformace	24
2.3.2 Materiál pro tvarovací nástroje	24
2.3.2.1 Hliníkové nástroje.....	24
2.3.3 Směrnice pro návrh tvarovacího nástroje	25
2.3.3.1 Boční úkosy	25
2.3.3.2 Zaoblení	25
2.3.3.3 Povrch nástroje	26
2.3.3.4 Odsávací kanály	26
2.3.4 Pomocný tvárník	28
2.3.4.1 Materiály tvárníků	28
2.3.4.2 Konstrukce tvárníků.....	29
2.4 Tepelná bilance	30
2.4.1 Energetické nároky před začátkem výroby	31
2.4.2 Energetické požadavky během výroby	32
2.4.3 Navrhování přímo temperovaného nástroje.....	32
2.4.4 Navrhování nepřímo temperovaného nástroje	34
2.5 Dokončování	34
2.5.1 Stříhání.....	35
2.5.2 Výpočet střížné síly.....	36
3. Experimentální část.....	37
3.1 Parametry tvarovací linky Likar VL 4060	37

3.2 Výpočet tepelné bilance	38
3.2.1 Podmínky výroby	38
3.2.2 Temperace před začátkem výroby	39
3.2.3 Temperace během výroby	39
3.2.4 Návrh temperačního systému	41
3.2.5 Návrh řešení temperační desky	43
3.3 Výpočet potřebné síly pro výsek výrobku	46
3.3.1 Výpočet střížného obvodu	46
3.3.2 Určení tloušťky stříhané desky	47
3.3.3 Stříhová pevnost	48
3.3.4 Dosazení a výpočet síly	48
3.4 Technologické parametry pro výrobu	49
3.5 Návrh konstrukce nástrojů	50
3.5.1 Bližší popis funkčních částí	52
3.5.1.1 Tvarovací forma	52
3.5.1.2 Pomocný tvárník	54
3.5.1.3 Temperovaná deska	54
3.5.1.4 Přidržovací rámy	55
4. Zhodnocení a závěr	56
Seznam použité literatury	57

Seznam použitých zkratk a symbolů

a	...Vzdálenost mezi formou a tvárníkem [mm]
ABS	...Akrylonitril-butadien-styren
c_M	...Měrná tepelná kapacita temperačního média [kJ/(kg·K)]
c_N	...Měrná tepelná kapacita nástroje [kJ/(kg·K)]
c_p	...Měrná tepelná kapacita materiálu za konstantního tlaku [kJ/(kg·K)]
d	...Průměr temperačního kanálu [mm]
F_s	...Střížná síla [kN]
HT	...Entalpie plastu při tvarovací teplotě
HV	...Entalpie plastu
HIPS	...Houževnatý polystyren
k	...Konstanta způsobu ochlazování [-]
l	...Délka temperačních kanálů [m]
l_{ef}	...Efektivní délka temperačních kanálů [m]
LDPE	...Nízkohustotní polyethylen
m_N	...Hmotnost nástroje [kg]
m_K	...Průtok materiálu [kg/h]
m_s	...Střížná mezera [mm]
O	...Střížný obvod [mm]
OPS	...Orientovaný polystyren
P	...Tepelný tok [kW]
P_v	...Počet vyrobených kusů za hodinu [ks/hod]
PE	...Polyethylen
PET	...Polyethylentereftalát
PP	...Polypropylen
PS	...Polystyren
PTFE	...Polytetrafluorethylen
PU	...Polyurethan
PVC	...Polyvinylchlorid
q	...koeficient kontaktu [-]
Q	...Tepelný výkon [kW]
Q_r	...Vyzářené teplo [kW]
Q_s	...Tepelný výkon [kJ/s, kW]

R	...Poloměr zaoblení [mm]
s	...Počáteční tloušťka materiálu [mm]
s_r	...Tloušťka materiálu v místě stříhu [mm]
S_0	...Bezpečnostní faktor [-]
S_B	...Houževnatý polystyren (HIPS)
S_s	...Střižná plocha [mm ²]
S_T	...Bezpečnostní faktor [-]
S_v	...Plocha půdorysu výrobku (nástroje) [mm ²]
T_0	...Počáteční teplota nástroje [°C]
T_f	...Teplota viskózního toku [°C]
T_g	...Teplota skelného přechodu [°C]
T_m	...Teplota tání [°C]
T_N	...Provozní teplota nástroje [°C]
t_p	...čas potřebný k ohřátí nástroje [min]
T_T	...Tvarovací teplota materiálu [°C]
t_T	...Doba výrobního cyklu [s]
T_V	...Teplota výrobku při vyndávání z formy [°C]
v	...Střižná vůle [mm]
\dot{V}	...Objemový průtok [l/min]
α	...Součinitel přestupu tepla [kW/(m ² ·K)]
ΔT_M	...Rozdíl teplot mezi vtokem a výtokem temperačního média [°C]
ΔT_{MW}	...Rozdíl teplot mezi povrchem nástroje a temperačním médiem [°C]
ρ_M	...Hustota temperačního média [g/cm ³]
ρ_v	...Hustota materiálu výrobku [kg/m ³]
τ_s	...Mez pevnosti ve smyku (střihová pevnost) [MPa]

1. Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá přípravou podkladů pro výrobu tvarové vložky (traye) pomocí technologie tvarování pro firmu VYVA PLAST.

Firma již daný výrobek vyrábí, proto byl k dispozici vzorový kus, který lze vidět na obrázku 1.1. Nyní by však chtěla změnit technologii, neboť byla zakoupena nová automatická tvarovací linka. Zatímco dosavadní výroba probíhá na starším manuálně obsluhovaném vakuovém tvarovacím stroji, který poskytuje výrobní kapacitu zhruba jednoho kusu za minutu a jako polotovar používá desky, nová linka značky Likar typu VL4060 by podle očekávání měla stihnout až deset výrobních cyklů za minutu v automatickém režimu bez nutnosti obsluhy, je schopna používat při výrobě vakuum i přetlak najednou a jako polotovar používá nekonečný pás materiálu v podobě role. Proto byly stanoveny následující cíle bakalářské práce: Vypracování teoretického úvodu pro technologii tvarování na automatických tvarovacích strojích. Dále teoretické propočty tepelné bilance nástroje a střižné síly pro výsek hotového výrobku z pásu polotovaru. Na závěr konstrukční návrh tvarovacích nástrojů pro výrobu zadaného předmětu v podobě ideového návrhu.



Obr. 1.1: Vzorový výrobek

2. Teoretická část

2.1 Tvarování plastů – základní principy

2.1.1 Princip tvarování [1], [2]

Tvarování je technologie výroby, u které je výsledného tvaru dosaženo bez většího přemísťování částic hmoty. Jako polotovary se používají desky nebo fólie. Materiál se ohřeje na teplotu, při které vykazuje dobrou tvárnost. U amorfních plastů tato optimální teplota leží těsně pod teplotou viskózního toku T_f , u semikrystalických plastů těsně nad teplotou tání T_m . Pokud by teplota byla nižší, uplatňovaly by se elastické vlastnosti, což by ve finálním výrobku způsobovalo vnitřní pnutí. Naopak při překročení optimální teploty se z plastu stává viskózní kapalina a deska ztrácí soudržnost. Pro kvalitní výsledek tažení je nutné, aby bylo prohřátí rovnoměrné, což je komplikováno špatnou tepelnou vodivostí polymerních materiálů. Tím se dosáhne kaučukovitě elastického stavu. Následně je polotovar působením vnější síly donucen zaujmout požadovaný tvar a v tomto tvaru ochlazen, většinou dotykem se stěnou chlazené formy. To způsobuje nerovnoměrnou tloušťku stěny konečného výrobku, neboť místa prvního dotyku desky s formou chladnou nejdříve a dále se nepodílí na tažení, takže mají tloušťku stěny největší. Naopak místa, kde se materiál dotkl formy nejpozději, se ztenčí nejvíce. Takto lze zpracovávat pouze termoplasty. V naprosté většině případů se tvarování provádí za tepla, pouze výjimečně lze některé velmi jednoduché výrobky tvarovat za studena. Výhodou této technologie je možnost vyrábět předměty s velkou plochou a zároveň tenkou stěnou, rozměry jsou limitovány pouze velikostí tvarovacího stroje a rozměry vyráběných desek. Běžně se tvarováním zpracovávají desky tloušťky až 10 mm a fólie již od tloušťky 0,1 mm. Další výhodou je i možnost tvarovat desky předem potištěné, případně jinak povrchově upravené. Největší využití nalézá tento způsob výroby v obalové technice. Typický postup tvarování vypadá následovně:

- ohřev na vhodnou tvarovací teplotu
- tvarování pomocí tvarovacího nástroje (formy)
- ochlazení výrobku na teplotu, při které je rozměrově stálý
- vyndání (sundání) výrobku z nástroje
- dokončování (např. výsek výrobku z desky)

Způsoby tvarování můžeme rozdělit podle různých hledisek. Například:

- podle druhu působící síly na mechanické a pneumatické tvarování

- podle typu formy na pozitivní a negativní
- podle postupu tvarování na prosté (jednorázové) a postupné tvarování (neboli tvarování s přetvarováním).

2.1.2 Mechanické a pneumatické tvarování [1], [3]

U mechanického tvarování se dosahuje požadovaného tvaru vzájemným působením částí dvoudílné formy. Tento způsob umožňuje používat vyšší tlaky než pneumatické tvarování. S výhodou lze kombinovat tvarování s oddělením výrobku od zbytku polotovaru.

Další, dnes již nejrozšířenější možností je pneumatické tvarování. K dosažení potřebné síly je použit rozdíl tlaku mezi vakuem nebo stlačeným vzduchem na jedné straně výrobku a okolním atmosférickým tlakem. Podle toho se pneumatické tvarování dá rozdělit na podtlakové a přetlakové.

2.1.2.1 Podtlakové a přetlakové pneumatické tvarování

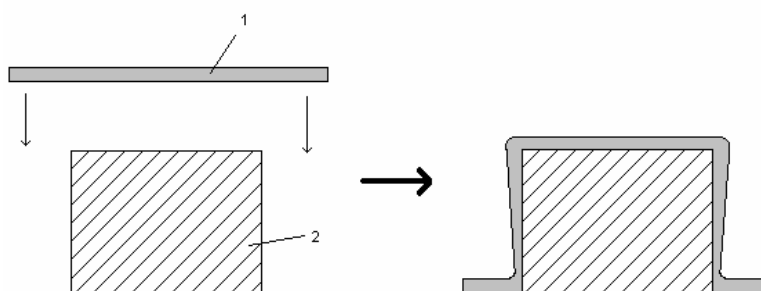
V praxi se nejčastěji používá podtlakové (vakuové) tvarování. K dosažení požadovaného tvaru je použito vakuum vytvořené vývěvou v dutině formy. Výsledný tlak je maximálně roven tlaku atmosférickému, tedy ne větší než 100kPa. To dovoluje použít formy z měkkých materiálů, které jsou lehce vyrobitelné a tím i levné. I tvarovací zařízení je oproti jiným technologiím relativně málo nákladné. Není tedy problém používat tvarování i v malosériové výrobě.

V případě, kdy síla vyvolaná vakuem nestačí, se používá přetlakové tvarování. Důvodem může být například velká tloušťka desky nebo materiál se špatnou tvarovatelností. Deska upnutá v rámu se neprodyšně spojí s uzavřenou komorou, do které je poté přivedeno tlakové médium. Nejčastěji se jedná o stlačený vzduch o tlaku kolem 1 až 2 MPa. Pro dokonalejší vytvarování může být zároveň v dutině formy vytvořeno vakuum. Výsledný působící tlak je tedy řádově vyšší než u vakuového tvarování. Na výrobu formy je nutné použít pevnější materiál a nástroje jsou tak většinou dražší než u předchozího způsobu.

2.1.3 Pozitivní a negativní tvarování [3]

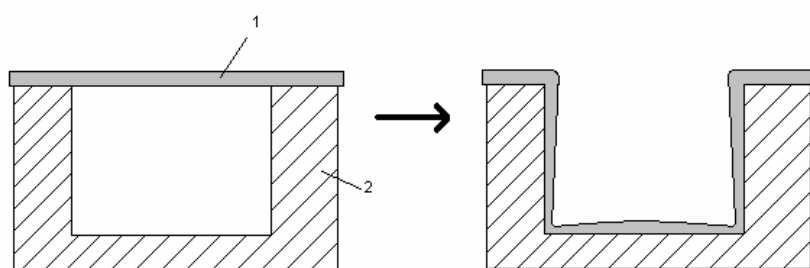
Při tvarování je většinou jen jedna strana desky v kontaktu s nástrojem (formou). Podle toho, zda se jedná o vnější nebo vnitřní stranu výrobku, rozlišujeme tvarování na pozitivní a negativní.

V případě, kdy se dotýká nástroje vnitřní strana výrobku, nástroj má tvar shodný s požadovaným výrobkem, pouze zmenšený o tloušťku stěny, mluvíme o pozitivním tvarování, neboli tvarování na tvárník. Kvalitnější a přesnější povrch je na vnitřní straně výrobku. Princip je ukázán na obrázku 2.1.



Obr. 2.1: Princip pozitivního tvarování, 1 – předeřhřátá deska plastu, 2 – nástroj (tvárník)

V případě, kdy se nástroje dotýká vnější stěna a nástroj má tvar negativu výsledného výrobku tak, jak je ukázáno na obrázku 2.2, mluvíme o tvarování negativním nebo také tvarování do dutiny. Kvalitnější povrch je na vnější straně. U složitějších výrobků dochází často ke kombinaci obou způsobů, pozitivně-negativnímu tvarování.



Obr. 2.2: Princip negativního tvarování, 1 – předeřhřátý polotovar, 2 – nástroj (tvárnice)

Výhody a nevýhody pozitivního tvarování:

- nástroje obvykle levnější než negativní
- nerovnoměrná tloušťka stěny v oblasti příruby
- větší tloušťka stěny v rozích u dna, slabé svislé stěny

- tendence tvoření vrásek, zejména u vysokých a hranatých nástrojů
- obtížnější sundávání výrobku z nástroje (smrštění vlivem teplotní roztažnosti plastu)

Výhody a nevýhody negativního tvarování:

- nástroje obvykle dražší
- rovnoměrná tloušťka stěny v oblasti příruby po celém obvodu
- nejslabší stěna v rozích u dna, nejsilnější svislá stěna u příruby
- jednodušší vyndávání hotového výrobku z formy

2.1.4 Jednorázové a postupné tvarování [2], [3]

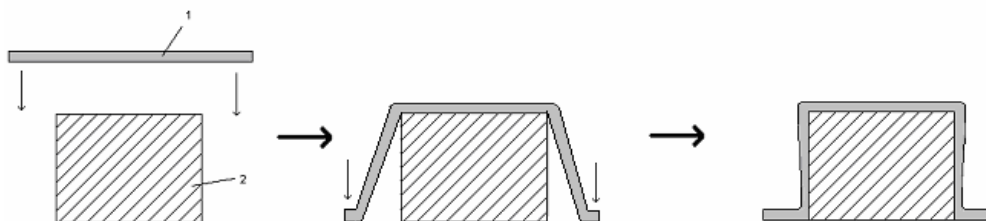
Nejjednodušší metodou je jednorázové tvarování. Polotovar se jednoduše připevní k formě, poté je ve formě vytvořeno vakuum, čímž se deska vytvaruje do požadovaného tvaru. Hotový výrobek je ochlazen a z formy vyjmut. Tento princip lze použít pro jednoduché výrobky, které mají malý poměr hloubky k ploše, neboť u takových výrobků se výrazně neprojeví nerovnoměrná tloušťka stěny. Čím je ale zmíněný poměr větší, tím je výroba jakostních dílů obtížnější. Proto se při výrobě složitějších součástí, zejména výrobků s velkým poměrem hloubky ku šířce zajišťuje lepší rovnoměrnost tloušťky stěny pomocí postupného tvarování.

Jak již název napovídá, proces postupného tvarování se dá rozdělit do několika (zpravidla dvou) částí, předtvarování a vlastní tvarování. Cílem předtvarování je z rovinné desky vytvořit prostorový tvar podobný finálnímu výrobku, ovšem s rovnoměrnou tloušťkou stěny, ze kterého lze poté lehce vytvarovat finální výrobek aniž by se stěna v některém místě výrazně ztenčila. Toho lze dosáhnout několika cestami:

- mechanické předtvarování, používající samotný nástroj
- mechanické předtvarování, používající pomocný tvárník
- pneumatické předtvarování pomocí předfukování, nebo předsátí
- kombinované mechanicko-pneumatické předtvarování

První způsob, tedy mechanické předtvarování používající samotný nástroj, lze aplikovat pouze v technologii pozitivního tvarování. Předtvarování je dosaženo pohybem tvarovacího nástroje, resp. jeho zajetím do tvarované desky. Výsledek je ukázán na obrázku 2.3. Teplota nástroje a tvarovací rychlost mají vliv na rozložení tloušťky stěny. Chladný

nástroj v kombinaci s nízkou tvarovací rychlostí vede k nejsilnější stěně na vrcholu, zatímco „horký“ nástroj spolu s vysokou rychlostí vytváří v tomto místě slabší stěnu.

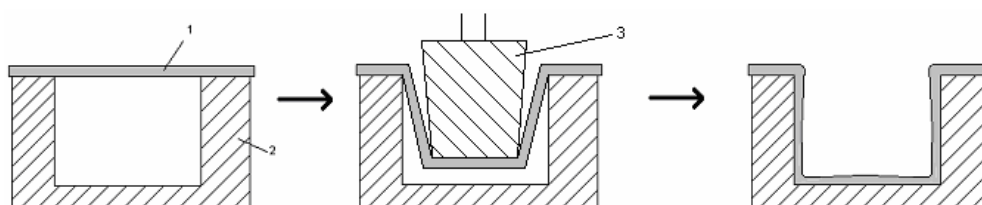


Obr. 2.3: Pozitivní tvarování s mechanickým předtvarováním,

1 – tvarovaná deska, 2 – forma (tvárník)

U negativního tvarování je pro mechanické předtvarování nutné použít pomocný nástroj – tvárník, který je zasunut do negativní dutiny formy. Princip je zřejmý z obrázku 2.4. Tření mezi tvárníkem a materiálem na čelní straně má za následek, že se více plastu dostane do dna výrobku, kde poté dochází při dotvarování k největšímu ztenčení. Aby deska nebyla příliš ochlazená, a tedy se podílela se na tažení celá, musí být tvárník z tepelně nevodivého materiálu, případně může být i vyhříván. Rozložení tloušťky stěny závisí zejména na:

- tvaru pomocného tvárníku
- hloubce předtvarování
- teplotě materiálu
- materiálu tvárníku
- teplotě tvárníku
- rychlosti pohybu tvárníku



Obr. 2.4: Negativní tvarování s mechanickým předtvarováním,

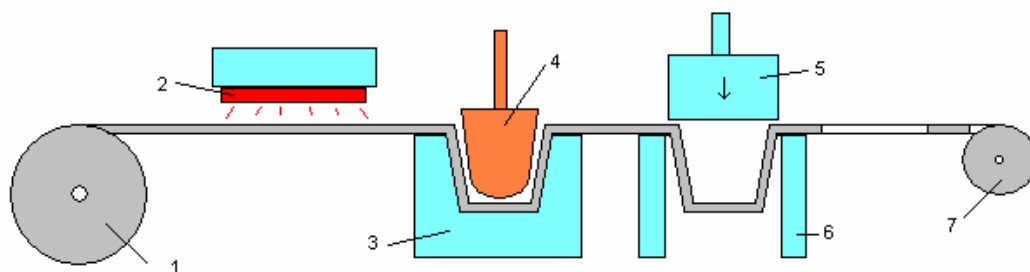
1 – tvarovaná deska, 2 – forma (tvárnice), 3 – pomocný tvárník

V daném případě půjde o kombinaci prvních dvou způsobů, tedy výhradně mechanického předtvarování, proto zde není rozvedena žádná forma předtvarování pneumatického.

2.1.5 Tvarovací stroje

Celý proces tvarování může být prováděn postupně, každá operace zvlášť a na zvláštním stroji. Většina takových strojů vyžaduje kvalifikovanou obsluhu a vlastní výroba je tak pomalá a nákladná. To je dnes výhodné jen při výrobě menších sérií.

Naproti tomu, je-li nutná vysoká produktivita, což je téměř vždy u středních a větších sérií výrobků, je vhodné zvolit výrobu na automatických tvarovacích linkách, které v sobě integrují celý výrobní proces. Zjednodušeně řečeno na začátku vstupuje polotovár a na konci vystupují hotové výrobky. Nároky na obsluhu jsou vysoké pouze při změně vyráběného dílu, neboť je nutné linku seřídít vždy na daný díl. Samotná výroba je pak ale velmi jednoduchá. Jako polotovar je většinou použit materiál navinutý v roli, který je postupně odvíjen nejprve přes ohřívací, pak tvarovací a nakonec výsekovou stanici. Hotové výrobky z vysekávací stanice padají do zásobníku. Zbytek polotovaru, který je stále ve tvaru pásu pouze s dírami po oddělených výrobcích, je na konci opět navíjen do tvaru role. Takováto integrace výrazně zkrátí výrobní cyklus, neboť veškerá manipulace a transport jsou prováděny automaticky, rychle a na krátké vzdálenosti. Výroba tak může být zhruba desetkrát rychlejší. Logickým důsledkem je však vysoká pořizovací cena stroje. Přibližné schéma tvarovací linky je na obrázku 2.5.



Obr. 2.5: Schéma automatické tvarovací linky, 1 - zpracovávaný materiál v roli, 2 – ohřívací stanice (většinou bývá ohřev oboustranný), 3 – forma (tvárnice), 4 – pomocný tvárník (pokud je použito mechanické předtvarování), 5 – střižník, 6 – střižnice, 7 – odvíjení zbytku materiálu (odpadu)

2.2 Vlastnosti plastů a jejich vliv na tvarování

2.2.1 Třecí vlastnosti během tvarování [3]

Třecí vlastnosti plastů jsou důležité zejména v případech, kdy je nutný pohyb mezi tvarovaným materiálem a nástrojem. To může nastat při negativním tvarování s mechanickým

přetvarováním, nebo při pozitivním tvarování během zasouvání nástroje do desky. Je-li tření velké, materiál se k nástroji přilepí při prvním dotyku a na těchto místech nemůže probíhat žádné další natahování. Je-li naopak tření velmi malé, například při použití tvárníku potahovaného nebo vyrobeného z PTFE, materiál klouže po styčné ploše velmi lehce. To je nevýhodné v případech, kdy se snažíme dostat více materiálu do dna výrobku v negativní formě. Proto je nutné dbát na třecí schopnost během tvarování.

2.2.2 Smrštění termoplastů [3]

Smrštěním se rozumí změna rozměrů desky termoplastu nebo výrobku vlivem tepla, aniž by na něj působila přídavná mechanická síla. Proto je vhodné před vlastním tvarováním materiálu udělat test smrštění. Smršťování probíhá ještě nějakou dobu po vychladnutí výrobku. Například deska ABS/PVC se smršťuje ještě 5 dní po zahřátí. Dodatečné smrštění by mělo být bráno v úvahu zejména při konstrukci střížných nástrojů, neboť během vystřihování výrobku není smrštění konečné a výsledný rozměr tedy nemusí odpovídat rozměru střížného nástroje.

Hodnoty smrštění lze pro konkrétní materiály najít v tabulkách, ale tyto údaje jsou pouze orientační, neboť skutečná hodnota závisí na výrobních podmínkách. Hlavně pro plasty s velkým rozptylem těchto hodnot je rozumné zjistit skutečné smrštění před výrobou formy například zjištěním od výrobce polotovarů nebo vlastní zkouškou.

2.2.3 Chování termoplastů během zahřívání [3]

2.2.3.1 Vliv tepelného cyklu

Typ instalovaného ohřívacího zařízení ovlivňuje tepelný cyklus. Při použití stejné konfigurace výrobní linky je tepelný cyklus ovlivněn druhem plastu (PS, HIPS, PVC, PP,...), jeho barvou a také tloušťkou tvarované desky.

Délka ohřevu roste s tloušťkou stěny, neboť plasty jsou velmi špatně tepelně vodivé. Nejkratšího času lze dosáhnout oboustranným ohřevem co největší intenzity. Je ale nutné dávat pozor, aby materiál nezačal degradovat. V praxi ohřev začíná s maximální možnou intenzitou, a ta se postupně zeslabuje. Přesto se ale pokaždé vyskytne teplotní gradient napříč tloušťkou materiálu. Objeví-li se v materiálu po skončení ohřevu nebo během tvarování nižší teplota než je potřebná, tvarování se stane nemožným nebo budou dosažené výsledky nekvalitní. Teplota uvnitř materiálu nejde změřit, aniž by došlo k jeho zničení. Určení optimálních hodnot probíhá experimentálně a vyžaduje hodně zkušeností. Moderní tvarovací stroje umí tyto parametry spočítat.

Materiál s malým teplotním rozdílem v průřezu neboli pomalu ohřívanou desku, lze snáze vytvarovat a výsledný výrobek má lepší mechanické vlastnosti. Deska ohřívána velmi intenzivně (blízko teplot degradace) vede k horším mechanickým vlastnostem a horšímu rozložení tloušťky stěny výrobku. Deska do 2,5 mm tloušťky může být při dostatečně dlouhém čase ohřívána jednostranně. Desky tlustší než zhruba 2,5 mm musí být ohřívány z obou stran.

2.2.3.2 Teplotní roztažnost a deformace

Pro určení změny rozměru po ohřátí termoplastu v tvarovacím stroji je potřeba znát koeficient délkové teplotní roztažnosti. Roztažnost je zhruba lineární a může tedy být spočten pomocí koeficientu délkové roztažnosti.

Při ohřevu termoplastu ve tvarovací lince se mohou objevit následující jevy se kterými je nutné počítat, když je dosaženo tvarovací teploty:

- Deska expanduje, dokud není dosaženo teploty změknutí.
- Při dosažení teploty změknutí (teploty skelného přechodu) jsou uvolněna všechna „zamrzlá“ napětí. Vysoce orientované fólie (např. LDPE) se od tohoto momentu začínají natahovat v upevňovacím rámu nebo řetězech. Ostatní materiály, jako PP nebo PVC, pokračují v expanzi dokud nedosáhnou tvarovací teploty.

- Při použití kontaktního ohřevu může roztažnost způsobit změnu v kontaktním tlaku a zanechat na povrchu desky stopy.
- Při použití sálavých zdrojů tepla se objevují dva problémy:
 1. Při změknutí musí být k tepelné roztažnosti připočteno prohnutí vlastní vahou desky. Je zde riziko dotyku prohnuté desky se spodním topným tělesem, což by způsobilo tepelnou degradaci materiálu.
 2. Je-li materiál podpořen proti prohnutí vzduchem, vzniká na něm zvrásnění. V případě výrazných vrásek se objeví teplotní rozdíl mezi vrcholy a proláklami, což má negativní dopad na kvalitu výrobku.

Prakticky není možné vypočítat prohnutí pro materiály, které mají velkou tendenci se prověsit.

2.2.3.4 Teplotní rámec pro tvarování

Rozmezí tvarovacích teplot je určeno podle:

- Nejnižší teploty, při které je ještě možné tvarovat při dosažení dostatečného množství detailů.
- Nejvyšší teploty, při které ještě není materiál teplotně degradován nebo při které je ještě zpracovatelný. Při překročení této teploty by se z materiálu stala tekutina a deska by ztratila soudržnost.

Příklad rámce tvarovacích teplot pro SB (HIPS):

- Tvarovací teploty pro přetlakové tvarování se pohybují od 120°C do 150°C (200°C).
- Tvarovací teploty pro vakuové tvarování leží v rozmezí od 165°C (140°C) do 190°C (200°C).

Hlavní snahou během ohřívání je dosáhnout rovnoměrného prohřátí ve všech místech povrchu desky. U sálavých zdrojů tepla by se proto měla věnovat pozornost oblastí přidržovacího rámu a vodicích řetězců, které mají vysokou odrazivost tepla.

2.2.4 Tažení termoplastů [3]

V optimálním rozmezí teplot stačí k vytvarování relativně malá síla. Není-li možné potřebné síly použitým strojem dosáhnout, je nutné dodat materiálu více tepla, aby mohlo být dosaženo potřebných detailů, nebo pokud je nutné velké dloužení fólie. Následkem může být fólie tvarována mimo pole optimální tvarovatelnosti. To je například případ dílů pro lednice vyráběných pozitivním vakuovým tvarováním s poloměry zaoblení v oblasti příruby menšími než 6 mm nebo negativně přetlakově tvarovaných kelímků na pití s poloměrem u dna menším než 1,5 mm. Čím je výrobek složitější, tím více se podmínky vzdalují optimálním. To způsobuje, že je rozložení tloušťky stěny hazardnější a boční stěny výrobku vykazují velmi slabá místa s vysokým dloužením. Pokud jsou nároky na ostrost detailů přílišné, může se stát, že daný díl vůbec nepůjde vyrobit.

2.2.5 Schopnost rozlišení detailů výrobku [3]

Tímto pojmem se rozumí většinou přesnost se kterou jsou tvary nástroje okopírovány výrobkem. Hlavními kritérii jsou malé poloměry zaoblení hran a povrchové struktury na straně, která je ve styku s formou. Schopnost rozlišení detailů ovlivňuje mnoho faktorů:

- druh plastu
- tloušťka zpracovávané desky
- tvarovací teplota napříč celou tloušťkou desky
- tvarovací síla a způsob jejího vyvinutí (vakuum, přetlak)
- teplota tvarovacího nástroje
- konstrukce odsávacích kanálů na nástroji

Čím větší je teplota tvarování, tím lépe jsou detaily reprodukovány. U materiálů tlustších než 4 mm musí být věnována pozornost tomu, aby bylo dosaženo rovnoměrného prohřátí napříč celou tloušťkou. Je-li to nutné, musí být snížena intenzita ohřevu a prodloužena jeho doba.

Také čím větší síla je použita, tím jednodušší je dosáhnout dobré ostrosti hran. Není-li možné vyvinout dostatečnou sílu, lze ji kompenzovat použitím vyšší tvarovací teploty.

I vyšší teplota nástroje poskytuje lepší reprodukci detailů. U přetlakového tvarování může být nízká teplota formy vykompenzována vyšším tvarovacím tlakem.

2.2.6 Chování termoplastů během ochlazování [3]

Jakmile je dokončen ohřev, neboli jakmile začne transport materiálu z ohřívací stanice do tvarovací, materiál začíná chladnout. Musí si však udržet nezbytnou tvarovací teplotu do započetí tvarování. To v praxi znamená, že doba mezi koncem ohřevu a začátkem tvarování musí být co nejkratší. Čím je tento čas delší, tím vyšší musí být teplota, na kterou je plast ohříván. Některé plasty však nelze ohřát příliš nad tvarovací teplotu, aniž by došlo k jejich tepelné degradaci. Proto je nutné použít vysokou rychlost transportu mezi ohřívací a tvarovací stanicí. Také během předtvarování je nutné počítat s tím, že dochází k ochlazování vedením tepla vlivem dotyku materiálu s pomocným tvárníkem nebo v případě pneumatického předtvarování vlivem nuceného proudění vzduchu.

Při započetí tvarovacího procesu začne také velmi intenzivní odvod tepla vlivem kontaktu materiálu s chladnou formou. Intenzita chlazení se pak ještě zvětšuje spolu s tím, jak se materiál dotýká nástroje čím dál větší plochou. Během tvarovací periody, která trvá pro tenké fólie jen pár desetin sekundy, ale pro tlustší polotovary může trvat i několik sekund, musí být deska dostatečně prohřátá aby byl produkován kvalitní výrobek. Na průběh chlazení má vliv:

- druh plastu
- tloušťka stěny po vytvarování
- tvarovací teplota
- teplota výrobku při vyndávání z nástroje
- materiál nástroje
- teplota nástroje
- intenzita kontaktu mezi výrobkem a nástrojem
- případné chlazení výrobku pomocí bezkontaktních způsobů (např. proudem vzduchu)

Vzhledem k rozdílným hodnotám měrné tepelné kapacity má druh plastu zásadní vliv na průběh ochlazování. SB má měrnou tepelnou kapacitu $1,3 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, na druhou stranu PP má měrnou tepelnou kapacitu $2,0 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. Vliv má i rozdílná tepelná vodivost jednotlivých plastů.

Tloušťka stěny po vytvarování je dalším důležitým faktorem, neboť odvod tepla je závislý na kontaktní ploše. To znamená, že čím víc je materiál natažený, tím je výsledná plocha styku větší, a tím více se materiál ztenčí a výsledný čas chlazení se zkrátí.

Vyšší požadovaná teplota tvarování má za následek více tepla vstřebaného v materiálu. Poté, když musí být toto teplo odvedeno, se prodlužuje čas chlazení. Z tohoto důvodu mají většinou přetlakové stroje kratší výrobní cykly než vakuové.

Ve většině případů je teplota výrobku při vyndávání z formy jen lehce pod teplotou skelného přechodu (optimálně se udává cca 20 °C pod T_g). Je-li však nezbytné, aby byl výrobek při vyndávání pevnější, je nutné prodloužit dobu chlazení a tím snížit jeho teplotu.

Čím lepší je tepelná vodivost materiálu nástroje, tím je také kratší čas chlazení. Proto například poměr časů ochlazování mezi nástroji z epoxidové pryskyřice, hliníku a temperovaného hliníku je 18:12:7. Nízká teplota nástroje poskytuje nižší chladicí časy. Ale tato teplota nemůže být snižována libovolně. Nejnižší hodnota je určena:

- zpracovávaným materiálem
- požadovanou ostrostí hran
- tloušťkou materiálu (hrozí vznik deformací, zejména s rostoucí tloušťkou stěny)

Intenzita kontaktu je slabá, je-li mezi nástrojem a výrobkem uvězněn vzduch. ten se může objevit, když je povrch nástroje příliš hladký nebo obsahuje-li příliš málo odsávacích otvorů. Je-li povrch výrobku zkřivený, pravděpodobně byl v těchto místech špatný kontakt s nástrojem. To vede k prodloužení chladicích časů nebo deformaci výrobků.

2.3 Nástroje pro tvarování

2.3.1 Základní principy [3]

Design tvarovacího nástroje je ovlivněn velikostí dávky, použitým tvarovacím strojem, geometrií výrobku, rozměrovou stabilitou a v neposlední řadě také požadovanou jakostí povrchu.

2.3.1.1 Velikost dávky

Pouze pár prototypových vzorků je vyráběno v cenově dostupných dřevěných nebo pryskyřičných formách a to v případech, kdy je potřeba nejprve posoudit design výrobku. Avšak pokud je výroba vzorků zamýšlena také pro získání dat jako jsou ztenčení, rozměrová stabilita a čas výrobního cyklu, je zapotřebí mít jednonásobnou testovací formu, která je schopna činnosti za běžných výrobních podmínek. Produkční formy jsou z pravidla vyráběny z hliníku nebo z kombinace hliníku a oceli. Zřídka kdy jsou používány kombinace hliníku s pryskyřicemi.

2.3.1.2 Geometrie výrobku

Design, rozměrová stabilita a kvalita povrchu musí být obvykle posuzovány dohromady. Většinou se najde místo, kde je nutné udělat kompromis mezi těmito faktory. Stává se to v případech, kde design a rozměrová stabilita vyžadují negativní tvarovací nástroj, ale vysoce lesklý povrch na straně odvrácené od nástroje si žádá pozitivní. Ten, kdo výrobek zadává, musí udělat ústupek, aby mohl být díl vyroben za optimálních podmínek. Zkušenosti ukázaly, že neochota ke kompromisu a ignorace technických limitů vede k selhání výroby.

2.3.1.3 Rozměrová stabilita

Strana výrobku, která se dotýkala formy, má vždy větší rozměrovou stabilitu než strana odvrácená. Když musí být po čase z pevnostních důvodů změněna tloušťka materiálu, může to vést až ke změně z pozitivního na negativní tvarování. Rozměrové tolerance na výrobku by nikdy neměly být menší než $\pm 10\%$ smrštění.

2.3.1.4 Jakost povrchu

Povrchové struktury na viditelné straně výrobku se mohou vytvořit pouze na straně styku desky s nástrojem, pokud je již neobsahuje tvarovaný materiál. Výrobky s dokonale lesklým povrchem by měly být vyráběny pokud možno tak, aby se lesklá strana nedotkla nástroje. Pro příklad lze uvést negativně tvarované vany a umyvadla.

2.3.1.5 Smrštění a deformace

U plastů náchylných k velkému smršťování (např. PE) se některé výrobky deformují, navzdory všem známým preventivním opatřením týkajícím se chladnutí. V těchto případech může být tvar nástroje upraven aby se přizpůsobil těmto geometrickým úchylkám.

2.3.2 Materiál pro tvarovací nástroje [3]

Následující materiály jsou používány při výrobě nástrojů:

- pálená sádra, nezpevněná, nebo zpevněná skelným vláknem (většinou pouze pro modely)
- dřevo pro limitovanou produkci vzorků
- odlévaná polyuretanová pryskyřice (PU) pro modely a výrobu zkušebních vzorků
- epoxidová pryskyřice pro malosériové nástroje
- hliníkové pláty plněné epoxidovou pryskyřicí
- vnější tvar odlitý z pryskyřice s temperovaným hliníkovým jádrem
- hliník ve formě plátů, precizního odlitku do keramiky nebo odlitku do písku.

2.3.2.1 Hliníkové nástroje

Hliník je upřednostňovaný materiál pro tvarovací nástroje. Jeho hlavními výhodami jsou výborná tepelná vodivost a lehká obrobiteľnosť. Pokud je to potřeba, lze určitými slitinami hliníku uspokojit i vysoké nároky na pevnost. Moderní počítačově řízené způsoby obrábění dovolují dnes již použít tento materiál i pro menší testovací nástroje. Pískové nebo keramické odlévání by mělo být pro výrobu použito jen v případech, kdy se obrábění ukáže jako neekonomické.

2.3.3 Směrnice pro návrh tvarovacího nástroje [3]

2.3.3.1 Boční úkosy

Během procesu tvarování se plast smršťuje směrem k pozitivnímu nástroji a směrem pryč od negativního nástroje. U negativního nástroje je toto smrštění výhodné, neboť usnadňuje vyndávání výrobku z jednonásobné formy. V případě pozitivního nástroje vede smrštění k přilnutí tvarované desky ke stěnám. Smrštění u vícenásobné negativní formy musí být posuzováno jako u pozitivního nástroje, protože materiál se smrští na spojovací části mezi jednotlivými výrobky.

Orientační hodnoty úkosů:

- Úkosy stěn by měly být co možná největší, zejména u pozitivního nástroje.
- Na pozitivním nástroji by zkosení nemělo být menší než 3° .
- Negativní jednonásobná forma může být, pokud je to nezbytné, vyrobena až s nulovými úkosy. Pro vícenásobnou negativní formu platí hodnoty jako pro pozitivní.
- Úkosy stěn pro negativní tvarování s povrchovou strukturou jsou předmětem hloubky struktury.

2.3.3.2 Zaoblení

Poloměr R by měl být v negativních oblastech volen tak, aby se plast dotkl nástroje v celé ploše. Pokud by byl rádius zaoblení moc malý, nebo dokonce žádný, deska by se v rohu u dna nedotkla formy. V takovém místě by byl velmi malý odvod tepla, který by způsobil prodloužení chladicích časů. Navíc by se mohla objevit deformace výrobku, způsobená různým smrštěním mezi rychleji a pomaleji chlazenými místy. Výrobek který není plně v kontaktu s nástrojem, by měl hůře reprodukovatelné zaoblení u dna negativu, neboť rádius by se vytvářel náhodně. Doporučenou minimální hodnotu zaoblení lze určit ze vztahu (2.1).

$$R = 1,5 \cdot s \quad (2.1)$$

Kde R ...poloměr zaoblení [mm],
 s ...počáteční tloušťka materiálu [mm].

Na výrobku je jednodušší dosáhnout ostré hrany na horním povrchu pozitivního nástroje než u dna negativního. Minimální poloměr R , dosažitelný v negativní oblasti téměř všemi termoplasty nezávisle na tloušťce stěny s , se pohybuje zhruba mezi 0,2 mm až 0,5 mm. Nezbytným předpokladem je malé natahování (poměr výšky k šířce kolem 0,4:1), vysoká teplota materiálu a přiměřeně vysoká teplota nástroje.

2.3.3.3 Povrch nástroje

Nejlepší tvarovací výsledky se dosahují s pískovanými povrchy. Když je povrch příliš hladký, vzduch nemůže unikat z mezery mezi nástrojem a materiálem, což zanechává na výrobku vady. Je-li naopak povrch příliš hrubý, vypadá povrch výrobku jako zašpiněný. Také to zhoršuje možnost materiálu po povrchu klouzat. Hrany, přes které musí materiál klouzat, mohou být u vysokých pozitivních nástrojů vyleštěny. Dosažený stupeň tření má vliv na tloušťku stěny výrobku. Plochy mohou být leštěny pouze pokud nehrozí uvíznutí bublin vzduchu.

2.3.3.4 Odsávací kanály

Počet a průměr odsávacích kanálů musí být dostatečně velký, aby zajistily rychlý odvod vzduchu (vytvoření vakua). Na druhou stranu nesmějí zanechávat stopy na povrchu výrobku.

Rozměry odsávacích otvorů

Průměr 0,2 mm až 0,3 mm:

- pro PP a PE všech tloušťek, v případě že je viditelná plocha ve styku s formou.

Průměr 0,4 mm až 0,5 mm:

- pro PP a PE použitý v přetlakovém tvarování nad teplotou tání T_m .

Průměr 0,5 mm až 0,6 mm:

- celkově pro přetlakové tvarování,
- pro PP a PE při vakuovém tvarování,
- pro vakuově tvarované citlivé viditelné povrchy (např. lesklé plochy).

Průměr 0,8 mm:

- celkově pro vakuové tvarování, pro velmi rychlé vytvoření vakua, hlavně u nástrojů pro automatické tvarovací stroje, ale ne pro PP a PE.

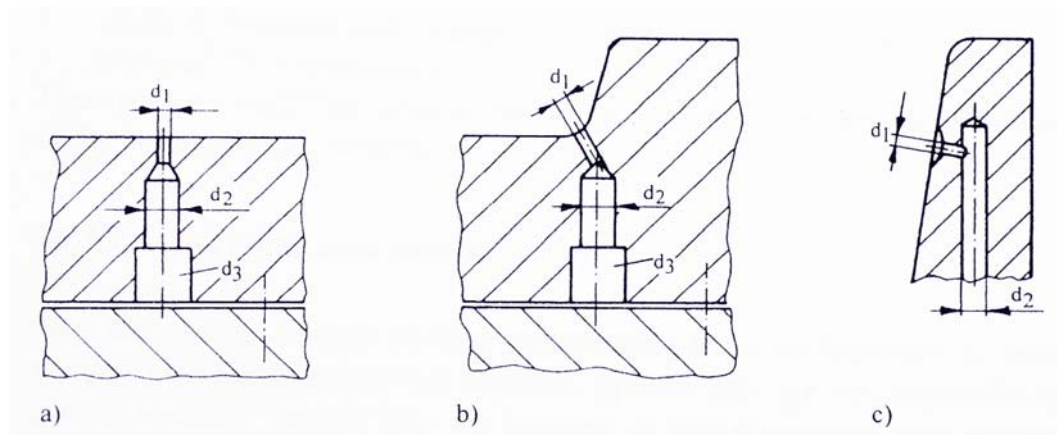
Průměr 1,0 mm:

- pro silné tloušťky materiálu od 6 mm výš, ale ne pro PE a PP.

Průměr 1,0 mm až 1,5 mm:

- pro pružné pěny.

Pro odvod vzduchu z velkých oblastí se používají kanály o průměru 6 mm až 8 mm.



Obr. 2.6: Konstrukce odsávacích otvorů v různých místech formy [3]

Odsávací díry jsou zvětšeny vrtáním ze zadní strany na větší průměr (4 mm až 10 mm), nebo větší průřez tak jak je vidět na obrázku 2.6. Díra malého průměru d_1 na povrchu by měla být napojena na větší průměr d_2 už po 2 mm až 4 mm, ještě než přejde ve velký odsávací kanál d_3 . Je-li díra průměru d_1 příliš dlouhá (hluboká), rychlost odsávání bude nižší.

2.3.4 Pomocný tvárník [3]

Požadované vlastnosti tvárníku:

- Je nutná malá tepelná vodivost (nesmí při kontaktu ochladit přehřátý materiál).
- Musí vykazovat požadované tření při styku s horkým materiálem.
- Musí odolávat tvářecím teplotám a tlakům.
- Měl by být lehce a levně vyrobitelný.

2.3.4.1 Materiály tvárníků

Často používaným materiálem pro výrobu pomocných tvárníků je dřevo. Nejlepší kluzné vlastnosti se dosahují při použití tvrdého dřeva (například javorového). Doporučuje se sledovat orientaci vláken tak, aby byla kolmá na směr pohybu nástroje. Ačkoliv překližka je velmi dobrý konstrukční materiál, neměla by být použita pro výrobu těl tvárníků, protože může na výrobku zanechávat otisky. Snížení ochlazovací schopnosti a zlepšení kluzných vlastností lze dosáhnout potažením dřevěného tvárníku měkkým textilem.

Plst je další možností, sice dražší než dřevo, ale může být upuštěno od potahování látkou. Rozměrová stabilita a odolnost proti otěru netvrzené plsti se zlepšuje povrchovým tvrzením pomocí nasáknutí povrchu speciálním nátěrem.

Syntetické pěny jsou velmi častým materiálem pro výrobu pomocných tvárníků, používaným zejména na automatických tvarovacích strojích. Pěny jsou na trhu dostupné v podobě desek i bloků, v rozsahu hustot zhruba od $0,2 \text{ g/cm}^3$ do $0,8 \text{ g/cm}^3$. Požadovaný tvar lze lehce vyrobít nástroji pro obrábění dřeva, takže je výroba levná. Další výhodou je vysoká izolační schopnost, proto ihned po dotyku neochladí přehřátou desku.

Požadujeme-li velmi složitý tvar, je často vhodnou volbou pryskyřice. Polyuretanové pryskyřice byly shledány jako nejvhodnější. Tvárník může být vyroben čistě z pryskyřice, nebo kombinací pryskyřice se dřevem.

Kov, většinou hliník, se používá jen ve zvláštních případech. Například je-li nutné tvárník v podobě značkovacího nástroje vyhřívat. Takový nástroj je velmi složitý na výrobu, a proto drahý, takže je nutné jeho použití dobře zvážit.

2.3.4.2 Konstrukce tvárníků

Obrys tvárníku lze obvykle odvodit z tvaru formy tím, že se udržuje ve všech místech stejná vzdálenost a . Pro průměry menší než 20 mm může mít tvárník pouze válcovitý tvar. Dále je nutné zaoblit hrany. Poloměr zaoblení je pro PS volen z tabulky 2.1.

Tab. 2.1: Minimální poloměry zaoblení hran pomocných tvárníků [3]

Tloušťka desky s [mm]	<1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ø tvárníku d [mm]											
10	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
20	1	2	2,5	3	3	3	-	-	-	-	-
30	1,5	2,5	3	4	4	4	4	4	-	-	-
40	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	-
50	2,5	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5
60	3	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5-6
70	3,5	5	5	5	5	5	5	5	5	5-6	5-6
80	4	5	5	5	5	5	5	5	5-6	5-6	5-6
90	4,5	5	5	5	5	5	5	5-6	5-6	5-6	5-6
100	5	5	5	5	5	5	5-6	5-6	5-6	5-6	5-6

Pro vypočtení rozměru a lze použít následující vztah (2.2)

$$a = 1,5 \cdot s + (1 \div 3) \quad (2.2)$$

Kde a ...vzdálenost mezi formou a tvárníkem [mm],
 s ...počáteční tloušťka materiálu [mm].

Prvotní tvar nástroje lze vytvořit podle obecných zásad. Poté je většinou třeba jej během zaběhávání upravit aby dokonale vyhovoval potřebám výroby.

2.4 Tepelná bilance [3]

Reprodukovatelných výsledků tvarování a chlazení lze dosáhnout pouze při použití temperovaného nástroje. Temperování znamená udržování co nejvíce konstantní teploty nástroje pomocí ohřevu a chlazení. Forma je přivedena na provozní teplotu ještě před začátkem výroby. Je-li forma přímo vybavena chladicím systémem, jako například odlitými kanály nebo zabudovanými trubičkami, mluví se o takzvaném přímém temperování. Pokud je chlazení zajišťováno pomocným temperovaným plátem, na který se forma přimontuje, je tento způsob nazýván nepřímé temperování. Jako temperační médium se nejčastěji používá voda. Používané teploty lze rozdělit do čtyř intervalů:

- Teplota nástroje v intervalu 0 °C až 20 °C (nebo do teploty okolí)
 - o Obvyklá teplota pro rychloběžné stroje, nástroj musí být ochlazován pomocí chladicí jednotky.
- Teplota v intervalu 20 °C až 95 °C
 - o Běžná teplota pro zpracovávání desek, méně používaná pro automatické pásové stroje, je nutné použít temperační jednotku.
- Teplota v intervalu 95 °C až 150°C
 - o Pro tvarování teplotně odolných plastů. Těchto teplot lze dosáhnout použitím uzavřeného, natlakovaného temperačního okruhu (aby se voda nezačala vařit). Například pro dosažení 150 °C je zapotřebí tlak zhruba 600kPa. Olej je jen těžce použitelný.
- Nástroj je nutné pouze ohřívat
 - o Většinou se používají elektrická topná tělesa. Nutné pro zpracování tenkých, teplotně velmi odolných fólií. Rozsah teplot elektricky vyhřívaných forem se pohybuje zhruba mezi 125 °C až 300 °C.

2.4.1 Energetické nároky na temperování před začátkem výroby [3]

Když musí být nástroj před započítáním výroby ohřátý, platí pro tepelný výkon $+Q_s$ vzorec (2.3).

$$+Q_s = \frac{1}{60} \cdot \frac{T_N - T_0}{t_p} \cdot (m_N \cdot c_N) \cdot S_0 \quad (2.3)$$

Když musí být nástroj chlazený platí pro tepelný výkon $-Q_s$ vzorec (2.4).

$$-Q_s = \frac{1}{60} \cdot \frac{T_0 - T_N}{t_p} \cdot (m_N \cdot c_N) \cdot S_0 \quad (2.4)$$

- Kde Q_s ...tepelný výkon [kJ/s, kW],
 T_N ...provozní teplota nástroje [°C],
 T_0 ...počáteční teplota nástroje (teplota okolí) [°C],
 t_p ...čas potřebný k ohřátí (ochlazení) [min], doporučené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.2.,
 m_N ...hmotnost nástroje [kg],
 c_N ...měrná tepelná kapacita nástroje [kJ/(kg·K)]
 pro hliník $c_N = 0,9$ kJ/(kg·K)
 pro ocel $c_N = 0,49$ kJ/(kg·K)
 pro měď $c_N = 0,4$ kJ/(kg·K)
 Je-li nástroj složen ze 2 materiálů, aplikuje se následující vztah:
 $(m_N \cdot c_N) = (m_{N1} \cdot c_{N1} + m_{N2} \cdot c_{N2})$,
 S_0 ...bezpečnostní faktor, zahrnující tepelné ztráty, $S = 1,1$ až $1,3$.

Tabulka 2.2: Doporučené temperační časy před startem výroby [3]

Hmotnost nástroje m_N [kg]	0-30	30-60	60-120	120-250	> 250
Čas temperace t pro vyhřívání nástroje [min]	10	10-15	15-20	20-30	30-45
Čas temperace t pro chlazení nástroje [min]	6-10	7-10	8-10	10-15	15-20

2.4.2 Energetické požadavky na temperování během výroby [3]

Aby byla udržena konstantní teplota formy během výroby, je nutné teplo dodané ohřátým zpracovávaným materiálem odvést pomocí temperačního média. Potřebný tepelný výkon pro udržení konstantní teploty nástroje během výroby lze spočítat ze vztahu (2.5) .

$$Q = 2,77 \cdot m_K \cdot (H_T - H_V) \cdot k \cdot S_T \cdot 10^{-4} + Q_r \quad (2.5)$$

- Kde Q ...tepelný výkon [kW],
 m_K ...průtok materiálu [kg/h] (uchycený lem se nebere v úvahu),
 H_T ...entalpie plastu při tvarovací teplotě [kJ/kg],
 H_V ...entalpie plastu při teplotě vyndávání z formy [kJ/kg],
 k ...konstanta vlivu způsobu ochlazování [-] (empirická),
- $k = 1,0$ až $0,9$ pro jednostranné ochlazování (např. běžné negativní tvarování bez nuceného proudění vzduchu)
- $k = 0,95$ až $0,85$ pro přetlakové tvarování
- $k = 0,7$ až $0,4$ při použití přídavného větráku nebo vodní mlhy
 S_T ...bezpečnostní faktor, $S_T = 1,0$ až $1,2$ (volí se),
 Q_r ...Vyzářené teplo [kW], zanedbatelné, zejména na automatických rychloběžných strojích.

2.4.3 Navrhování přímo temperovaného nástroje [3]

Potřebný průtok \dot{V} temperačního média je vyjádřen vztahem (2.6). Pro vodu jako temperační médium lze vycházet ze vztahu (2.7).

$$\dot{V} = 60 \cdot \frac{P}{c_M \cdot \rho_M} \cdot \frac{1}{\Delta T_M} \quad (2.6)$$

$$\dot{V} = 14,4 \cdot \frac{P}{\Delta T_M} \quad (2.7)$$

- Kde \dot{V} ...průtok média [l/min],

- P ...potřebný tepelný tok [kW],
- c_M ...měrná tepelná kapacita média [kJ/(kg·K)],
pro vodu $c_M = 4,18$ kJ/(kg·K),
- ρ_M ...hustota média [g/cm³],
- ΔT_M ...rozdíl teplot mezi vtokem a výtokem [°C],
běžně $\Delta T_M = 3$ °C až 5 °C.

Potřebné rozměry temperačních kanálů

Jako charakterický rozměr se používá součin délky a průměru temperačních kanálů. Jeho optimum lze spočítat ze vzorce (2.8).

$$(d \cdot l) = \frac{P \cdot 10^3}{\pi \cdot \alpha} \cdot \frac{1}{\Delta T_{MW}} \quad (2.8)$$

- Kde d ...průměr temperačních kanálů [mm], doporučená hodnota je uvedena v tabulce 2.3,
- l ...délka temperačních kanálů [m],
- P ...tepelný tok [kW],
- α ...součinitel přestupu tepla [kW/(m²·K)],
pro vodu $\alpha = 2,3$ až 3,5 [kW/(m²·K)],
- ΔT_{MW} ...rozdíl teplot mezi povrchem nástroje a temperačním médiem [°C],
běžně $\Delta T_{MW} = 3$ °C až 5 °C.

Tabulka 2.3: Doporučený průměr d temperačních kanálů [3]

	Doporučený $\varnothing d$ pro hliníkové nástroje			
Hmotnost nástroje m_N [kg]	0 - 60	60 - 120	120 - 250	> 250
Průměr kanálů [mm]	10	12	14	15

Efektivní délka temperačních kanálů l_{ef} vychází ze vztahu (2.9).

$$l_{ef} = \frac{(d \cdot l)}{d} \cdot q \quad (2.9)$$

Kde l_{ef} ...efektivní délka temperačních kanálů [m],
 d ...průměr temperačních kanálů [mm],
 l ...délka temperačních kanálů [m],
 q ...koeficient kontaktu (empirický) [-],
 $q = 1$ pro hluboko vrtané díry a odlité kanály,
 $q = 1,3$ až $1,6$ pro zabudované trubičky.

2.4.4 Navrhování nepřímo temperovaného nástroje [3]

Pro nepřímo temperovaný nástroj platí stejný postup výpočtů jako pro přímo temperovaný tak, jak bylo ukázáno v kapitole 2.4.3, avšak rozdíl teplot ΔT_{MW} je nutné uvažovat o 1 až 3 °C menší, aby bylo dosaženo podobných tepelných podmínek jako u přímo temperovaného nástroje. Pro dokonalý přestup tepla mezi temperovaným plátem a tvarovací formou musí být dodrženo několik zásad:

- Plocha styku musí být pokryta tepelně vodivým médiem (např. olejem).
- Pro smontování musí být použit dostatečný počet šroubů aby se zamezilo oddálení obou částí vlivem teplotní roztažnosti.
- Průřez odsávacích kanálů musí být volen tak, aby zbývající plocha zůstala co největší.

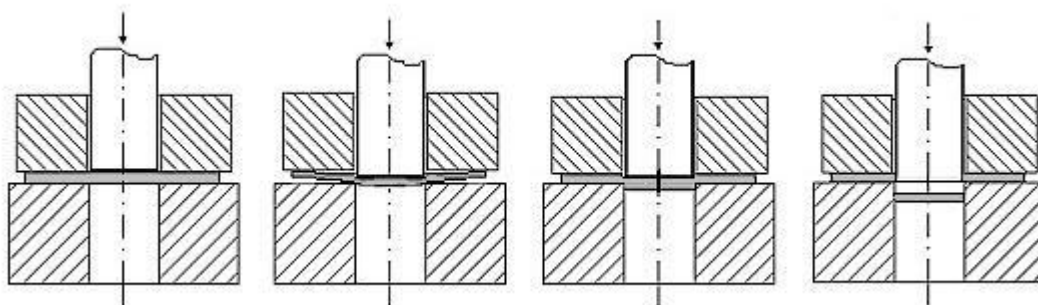
2.5 Dokončování [4]

Existuje několik možných způsobů, jak oddělit vytvarovaný výrobek od zbytku materiálu. Menší díly mohou být odstřiženy ihned po tvarování, kdy jsou ještě ve formě, nebo mohou být vyndány z formy a vystřiženy na stříhacím lisu. Tato činnost je většinou automatizována. Rozměrné výrobky se většinou oddělí od tvarovacího nástroje, poté jsou umístěny do stříhacího rámu a vystřiženy pomocí kotoučových pil, pásových pil, rozbrusných kotoučů, horkých nožů nebo dalších zařízení. Velké díly jsou většinou oddělovány ručně.

Středně velké výrobky mohou být vystřihovány jak ručně, tak i automaticky, jakmile je díl zafixován. K automatickému oddělování středních, případně velkých dílů se používá vodní paprsek nebo laser.

2.5.1 Stříhání [4], [5]

Stříhání je technologie plošného tváření směřující k úmyslnému překročení meze pevnosti ve smyku a následnému definovanému porušení materiálu. K vyvolání potřebného smykového napětí jsou použity dvě protilehlé řezné hrany. K tomu se používá střížný nástroj, složený ze dvou částí, střížníku a střížnice. Jsou to dva do sebe zapadající nástroje, kde ve střížnici je díra odpovídající požadovanému tvaru výstřižku. Střížník má naopak vnější tvar shodný s výsledným tvarem výstřižku. V praxi jsou tyto rozměry zvětšeny, resp. zmenšeny o takzvanou střížnou vůli v . Jedná se v podstatě o nepřesnost v rozměrech střížníku a střížnice. Častěji se však pracuje s takzvanou střížnou mezerou $m_s = v/2$ která je polovinou střížné vůle, tedy vůle připadající na jednu stranu nástroje. Princip stříhání je vidět na obrázku 2.7. Průběh stříhání lze rozdělit do 3 fází.



Obr. 2.7: Princip stříhání

V první fázi dochází k pružným deformacím, materiál je ohýbán a vtlačován do otvoru střížnice. Ve druhé fázi nastávají plastické deformace. Střížník je dále vtlačován do materiálu, napětí překračuje mez kluzu, na hranách nástrojů se blíží mezi pevnosti. Ve třetí fázi dochází k překročení meze pevnosti, na hranách se objevují trhlinky, ty se rozšiřují až dojde k oddělení (usmýknutí) materiálu. Výrobek se většinou oddělí ještě dříve, než střížník projde celou tloušťkou desky.

Výsledná stříhaná plocha není zcela rovinná, místa prvního výskytu trhlin mají vyšší drsnost. Velmi významný vliv na kvalitu střížné plochy má střížná mezera. Čím je menší, tím

je dosaženo vyšší jakosti. To je však náročné na přesnost výroby nástroje, neboť jakmile by se místo mezery objevil přesah, došlo by k zadření, a tedy ke zničení nástroje.

2.5.2 Výpočet střížné síly [4]

Velikost střížné síly F_s se při stříhu s rovnoběžnými noži vypočítá podle vztahu (2.10)

$$F_s = S_s \cdot \tau_s = O \cdot s_\tau \cdot \tau_s \quad (2.10)$$

Kde S_s ...střížná plocha [mm²],
 O ...střížný obvod [mm],
 s_τ ...tloušťka materiálu v místě stříhu [mm],
 τ_s ...mez pevnosti ve smyku, tzv. stříhová pevnost [MPa].

Stříhovou pevnost τ_s lze zjistit z tabulky 2.4.

Tabulka 2.4: Stříhová pevnost některých plastových materiálů [6]

Druh plastu	Stříhová pevnost τ_s [MPa]	Mez pevnosti v tahu σ_m [MPa]
Rozvětvený polyetylén Alkathen WJG11, vstřikovaný	12,8	14,0
Rozvětvený polyetylén Alkathen WJG11, lisovaný	10,7	10,9
PVC – lisované desky	61,5	63,3
Houževnatý polystyren, vytlačované desky	41,1	30,6
Acetylcelulóza Sicalit	38,1	-
Lineární polyetylén Eltex 5065, vstřikovaný	20,1	-

3. Experimentální část

Zadaným výrobkem je tvarová vložka, takzvaný tray, která slouží jako proklad do kufru, v němž je distribuována aku-vrtačka. Z technologického hlediska se jedná o tvarovaný výrobek z 2mm silné desky houževnatého polystyrenu HIPS (dodávaného pod obchodním názvem Senosan HP20), vyráběný technologií pozitivně-negativního vakuově-přetlakového tvarování.

3.1 Parametry tvarovací linky Likar VL4060

Jedná se o automatickou tvarovací linku s příslušenstvím. Linka je vybavena servopohony zajišťujícími pohyb přes pákový mechanismus, PLC řízením značky OMRON a dotykovým terminálem. Regulaci oboustranného ohřevu lze provádět zvlášť pro několik částí topných těles. Linka má zásobník vakua a stlačeného vzduchu a lze na ní zpracovávat materiály: PVC, PS, OPS, PET, PP, ABS. Součástí linky jsou 3 stanice s možností výseku. Technická data jsou shrnuta v tabulce 3.1. Linka je vyfocena na obrázku 3.1.

Tabulka 3.1: Technická data linky Likar VL4060

Parametr	Jednotky	Hodnota
Délka	mm	8000
Šířka	mm	2500
Výška	mm	2500
Rozměry pracovní plochy	mm x mm	400 x 600
Maximální zdvih negativ	mm	145
Maximální zdvih pozitiv	mm	145
Celkový příkon	kW	75
Příkon topení	kW	42
Rozměry keramických topných těles (ELSTEIN)	mm x mm	120 x 120
Výkon vzduchového čerpadla	m ³ /hod	63
Uzavírací síla výsekové stanice	kN	500
Maximální síla materiálu	mm	2,5
Garantovaný výkon pro PP tloušťky 0,35 mm	cyklů/min	30



Obr. 3.1: Tvarovací linka Likar VL4060

3.2 Výpočet tepelné bilance

Následující výpočet je proveden pro výrobu zadaného výrobku (traye) na automatické tvarovací lince VL 4060. Za optimální výsledek je považováno, stihne-li se vyrobit 10 výrobků za minutu, délka ideálního výrobního cyklu je tedy $t_T = 6$ s. Nástroj je temperován nepřímo, pomocí temperované desky připevněné ke spodní ploše formy. Výpočty vycházejí z teorie a mají orientační charakter, v praxi se mohou projevit další faktory ovlivňující výrobní proces, které nebyly zahrnuty. Proto je možné výsledné parametry upravit po praktickém odzkoušení tak, aby výsledky vyhovovaly požadavkům.

3.2.1 Podmínky výroby

Materiál nástroje:

Nástroj bude vyroben z hliníku. Hmotnost nástroje m_N zatím není známa.

Měrná tepelná kapacita pro hliník je $c_N = 0,9$ kJ/(kg·K).

Zpracovávaný materiál:

Senosan HP20 (obchodní název, jedná se o desky z HIPS), tloušťka

$s = 2$ mm, plocha půdorysu výrobku $S_v = 0,375 \cdot 0,281 = 0,105$ m²,

hustota materiálu výrobku $\rho_v = 1050$ kg/m³.

Doba výrobního cyklu:

$t_T = 6$ s.

Teplota nástroje:

Pracovní teplota nástroje byla stanovena na $T_N = 35$ °C.

Teplota nástroje před začátkem výroby je rovna teplotě okolí $T_0 = 22$ °C.

Tvarovací teploty materiálu:

Tvarovací teplota materiálu byla stanovena podle tabulek $T_T = 185\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Teplota výrobku při vyndávání z formy byla stanovena $T_V = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Bezpečnostní faktor:

Bezpečnostní faktor byl zvolen $S_T = 1,1$.

3.2.2 Temperance před začátkem výroby

Hmotnost formy zatím není známa, tedy nelze spočítat potřebnou dobu a výkon na její předehřev před započítáním výroby. Až bude známa hmotnost, lze tento výpočet provést podle kapitoly 2.4.1 .

3.2.3 Temperance během výroby

Obecný vztah pro výpočet dodaného (odváděného) tepla je vyjádřen rovnicí (2.5).

Specifikace jednotlivých hodnot:

Průtok materiálu lze díky platnosti zákona zachování objemu spočítat z objemu desky před tvarováním, tedy jako součin plochy půdorysu nástroje S_v a tloušťky zpracovávané desky h násobený hustotou materiálu a počtem zhotovených kusů za hodinu, tedy ze vztahu (3.1) po dosazení hodnot z tabulky 3.2.

$$m_K = S_v \cdot h \cdot \rho_v \cdot P_v \quad (3.1)$$

Tabulka 3.2: Hodnoty veličin pro výpočet průtoku materiálu m_K

Veličina:	Rozměr:	Hodnota:
Plocha půdorysu nástroje S_v	m^2	0,144
Tloušťka polotovaru s	m	0,002
Hustota materiálu ρ_v	kg/m^3	1050
Počet vyrobených kusů za hodinu P_v	ks/hod	600

$$m_K = 0,144 \cdot 0,002 \cdot 1050 \cdot 600 = 181 \text{kg} / \text{h} \quad (3.2)$$

Rozdíl entalpií $(H_T - H_V) = \Delta H$ lze získat řešením diferenciální rovnice (3.3).

$$dH = c_p \cdot dT \quad (3.3)$$

Kde H ...Entalpie [kJ/kg],
 c_p ...Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku [kJ/(kg·K)], z tabulek
 pro PS (SB) $c_p = 1,3$ [kJ/(kg·K)],
 T ...teplota [K].

$$\int_{H_V}^{H_T} dH = \int_{T_V}^{T_T} c_p \cdot dT \quad (3.4)$$

$$H_T - H_V = c_p \cdot (T_T - T_V) \quad (3.5)$$

$$\Delta H = 1,3 \cdot (185 - 60) = 162,5 [\text{kJ} / \text{kg}] \quad (3.6)$$

Koeficient způsobu ochlazování k :

V daném případě se jedná o jednostranné ochlazování za použití přetlaku, proto byl podle tabulek stanoven koeficient $k = 0,9$

Bezpečnostní faktor:

Bezpečnostní faktor byl zvolen z běžného rozsahu $S = 1,1$

Vyzářené teplo:

V daném případě je délka cyklu tak krátká, že lze vyzářené teplo zcela zanedbat a počítat $Q_r = 0$

Dosazení a výpočet:

$$Q = 2,77 \cdot 181 \cdot 163 \cdot 0,9 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} + 0 = 8,1 \text{ kW} \quad (3.7)$$

Výsledný tepelný výkon, který je nutné odvést pomocí temperačního média tedy vyšel $Q = 8,1$ kW.

3.2.4 Návrh temperačního systému

Jako temperační médium je použita voda. Temperace nástroje je nepřímá, tedy prováděna pomocí temperované desky připevněné k nástroji. Potřebný objemový průtok pro vodu určíme užitím vztahu (2.7).

Specifikace jednotlivých hodnot:

- Rozdíl teplot média mezi vstupem a výstupem temperačního okruhu ΔT_M byl zvolen 4 °C.
- Potřebný tepelný tok P je roven spočtenému odváděnému teplu $Q = 8,1 \text{ kW}$.

Dosažení a výpočet:

$$\dot{V} = 14,4 \cdot \frac{8,1}{4} = 29,2 \text{ l/min} \quad (3.8)$$

Výsledný průtok temperačního média je tedy $\dot{V} = 29,2 \text{ l/min}$.

Kontrola:

- Parametry použitého chladiče temperační kapaliny MTA typu TAE evo 101/P3 ukázaném na obr. 3.2 jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3: Parametry použitého chladiče TAE evo 101/P3

Objem nádrže [l]	255
Průtok [m3/hod]	5,1/9,6
Tlak [bar]	2,6/1,7
Příkon [kW]	0,9



Obr. 3.2: Chladič temperační kapaliny MTA, typ TAE evo 101/P3

- Průtok $5,1 \text{ m}^3/\text{hod} = 85 \text{ l/min}$. Požadovaný objemový průtok $\dot{V} = 29,2 \text{ l/min}$ je téměř třikrát menší, tedy kapacita stroje je postačující.

Potřebné rozměry temperačních kanálů vyjadřuje vztah (2.8).

Specifikace jednotlivých hodnot:

- Rozdíl teplot mezi povrchem nástroje a temperačním médiem je zvolen z rozsahu uvedeného v teorii $\Delta T_{MW} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Součinitel přestupu tepla je podle tabulek $\alpha = 3,5 \text{ [kW/(m}^2\cdot\text{K)]}$.

$$(d \cdot l) = \frac{8,1 \cdot 10^3}{\pi \cdot 3,5} \cdot \frac{1}{4} = 184,1 \quad (3.9)$$

- Doporučený průměr temperačního kanálu je za předpokladu hmotnosti nástroje v rozsahu 120 až 250 kg uváděn $\varnothing d = 14 \text{ mm}$.

Efektivní délka kanálů je pak vyjádřena vztahem (2.9).

- Koeficient q byl odhadnut po konzultaci s odborníky z firmy VYVA PLAST $q = 1,1$. U daného nástroje jsou kanály temperačního okruhu sice řešeny zabudovanými měděnými trubičkami, ale dostatečný přestup tepla je zajištěn zalitím trubiček speciální pryskyřičnou směsí

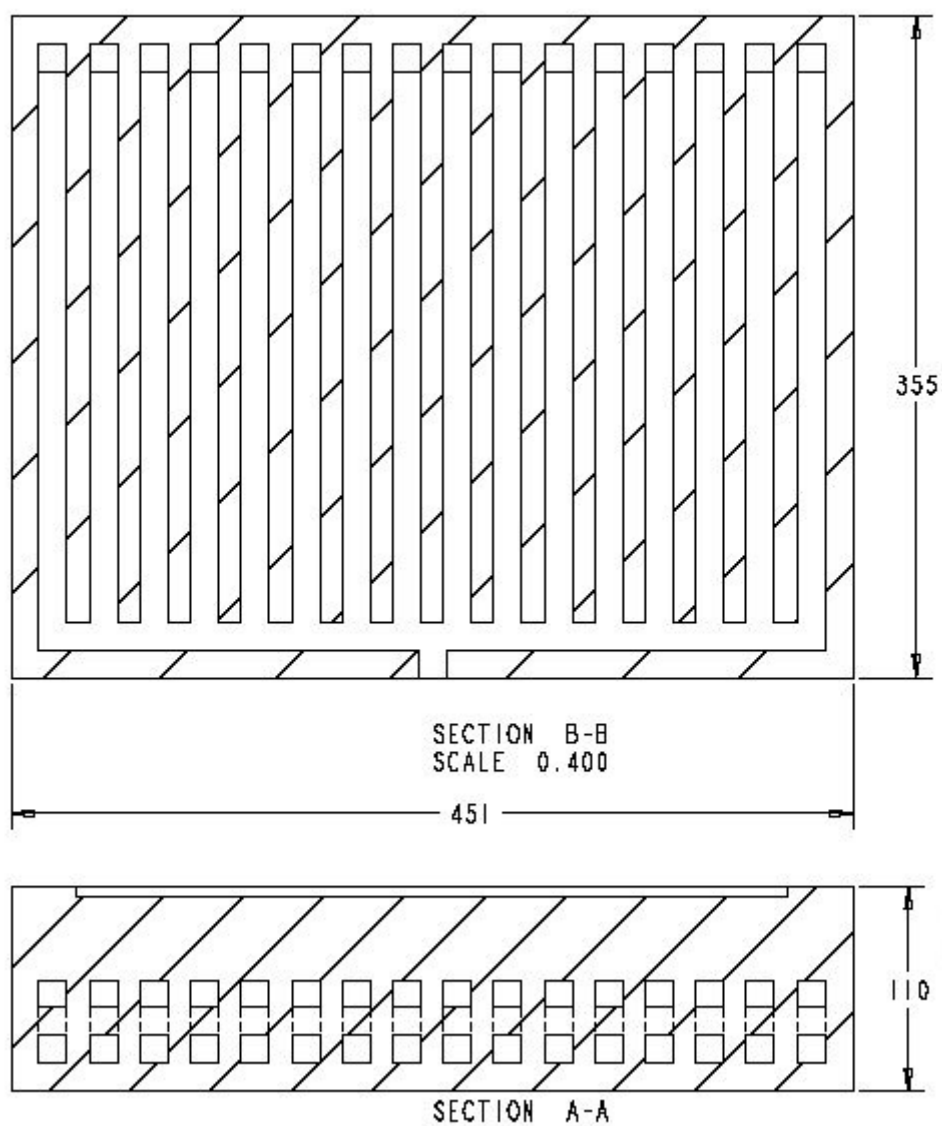
s vysokým obsahem hliníkového prášku, který zajišťuje dobrou tepelnou vodivost.

$$l_{ef} = \frac{184,1}{14} \cdot 1,1 = 14,47m \quad (3.10)$$

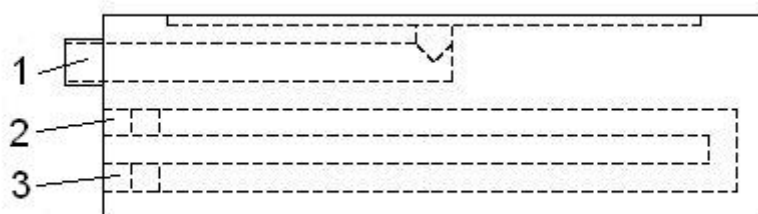
Do temperační desky je tedy nutné zabudovat 14,47 m temperačních kanálů.

3.2.5 Návrh řešení temperační desky

Z výpočtu (3.10) bylo zjištěno, že pro dostatečný odvod tepla je zapotřebí temperační potrubí o celkové délce 14,47 m. Vzhledem k velikosti výrobku je přibližný rozměr desky stanoven tak, jak je uvedeno v obrázku 3.3, ideovém návrhu řešení temperačních kanálů, které jsou umístěny ve dvou vrstvách nad sebou. Pohled z boku je ukázán na obrázku 3.4. Po vstupu do temperačního systému desky je médium rozvedeno příčným kanálem do soustavy šestnácti podélných. Na jejich konci je vytvořeno propojení jednotlivých kanálů s druhou vrstvou, která je tvarově identická. Temperační médium v ní tak proudí opačným směrem zpět. Před výstupem z desky jsou opět všechny podélné kanály svedeny jedním příčným k ústí hadice která odvádí kapalinu do chladiče. Kanály vyobrazené na tomto obrázku mají čtvercový průřez, což se v praxi změní zabudováním měděných trubiček na průřez kulatý.

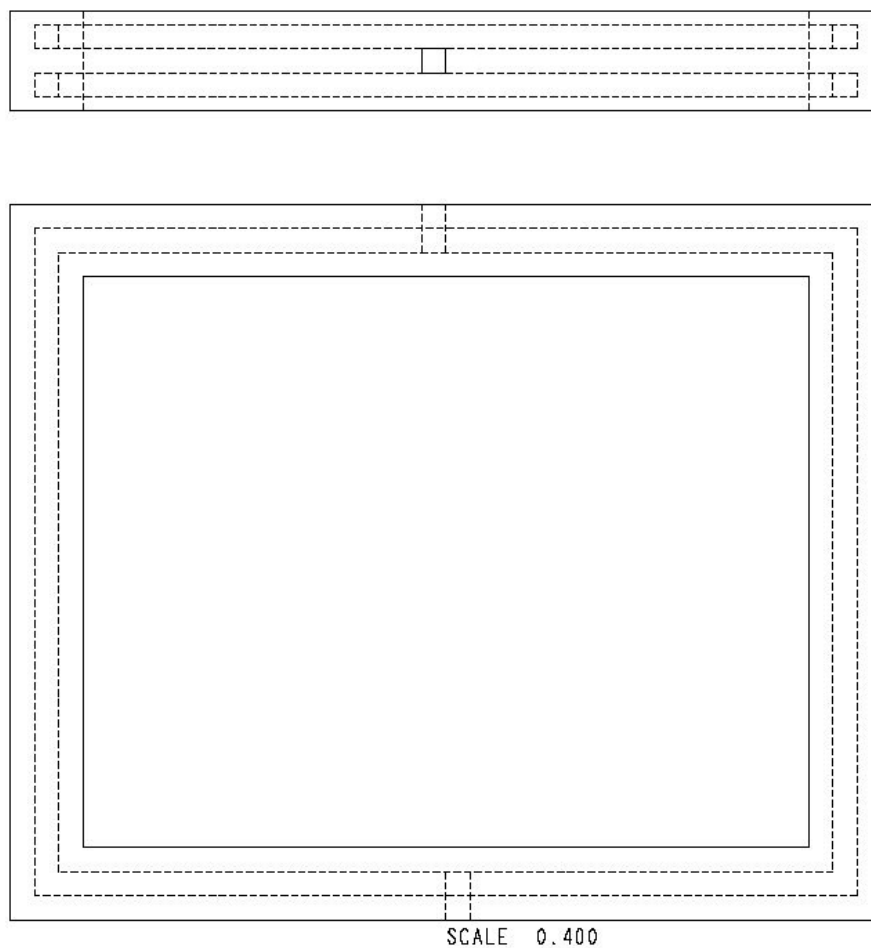


Obr. 3.3: Ideový návrh provedení temperačních kanálů, nahoře půdorys v řezu, dole nárys v řezu



Obr. 3.4: Bokorys temperační desky, 1 – odsávací potrubí, 2 – vstup temperační kapaliny, 3 – výstup temperační kapaliny

V případě, že by byl odvod tepla nedostatečný, lze na spodní část formy připevnit ještě druhé temperační těleso na obvodové svislé stěny, které je vidět na obrázku 3.5, se dvěma paralelními okruhy po obvodu formy.

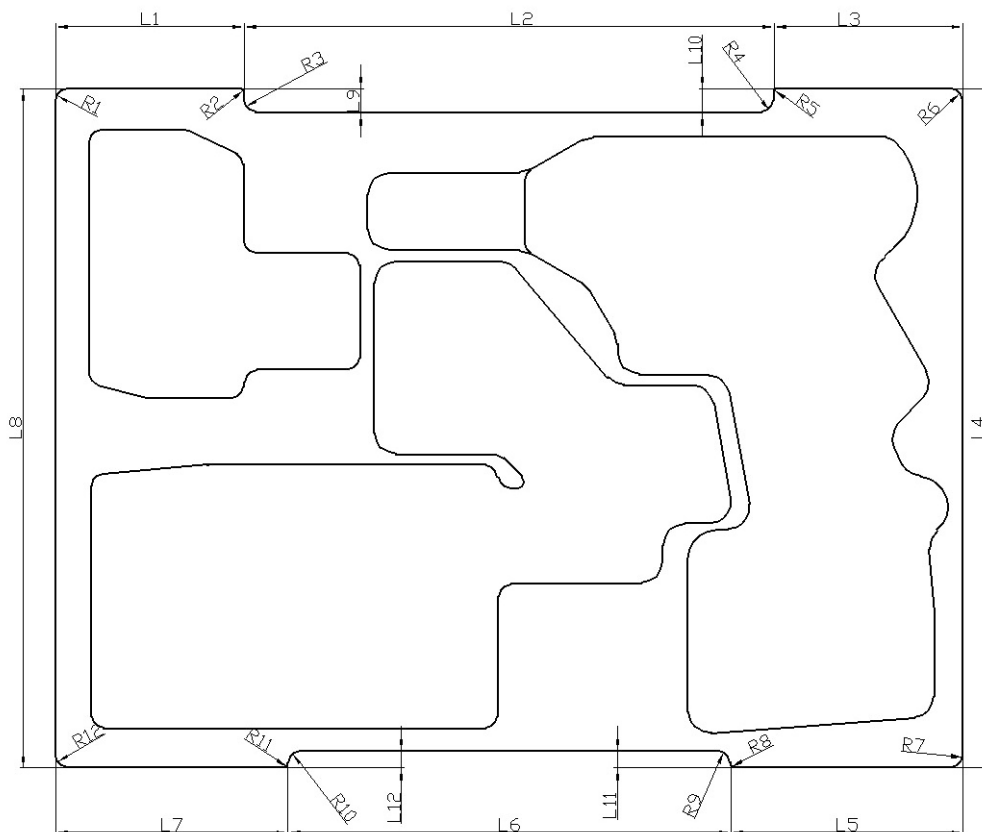


Obr. 3.5: Pomocný temperační rám, dole přidorys, nahoře narys

3.3 Výpočet potřebné síly pro výsek výrobku

Výpočet střížné síly lze provést podle vztahu (2.10).

3.3.1 Výpočet střížného obvodu O



Obr. 3.6: Střížný obvod (Poznámka: Čísla na kótách nejsou hodnoty rozměrů, ale indexy z tabulky 3.4)

Délku střížného obvodu lze určit sečtením délek jednotlivých rovinných úseků a délek oblouků v zaoblených rozích (viz. obr. 3.6) jak je vidět ze vztahu (3.11).

(3.11)

$$\begin{aligned}
 O = & (L_1 - R_1 - R_2) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot R_2\right) + (L_9 - R_2 - R_3) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot R_3\right) + (L_2 - R_3 - R_4) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot R_4\right) + \\
 & + (L_{10} - R_4 - R_5) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot R_5\right) + (L_3 - R_5 - R_6) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot R_6\right) + (L_4 - R_6 - R_7) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot R_7\right) + \\
 & + (L_5 - R_7 - R_8) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot R_8\right) + (L_{11} - R_8 - R_9) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot R_9\right) + (L_6 - R_9 - R_{10}) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot R_{10}\right) + \\
 & + (L_{12} - R_{10} - R_{11}) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot R_{11}\right) + (L_7 - R_{11} - R_{12}) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot R_{12}\right) + (L_8 - R_{12} - R_1) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot R_1\right)
 \end{aligned}$$

Tabulka
3.4:
Hodnoty
y
rozměrů
ú
z obráz

ku 3.6

Označení úseku	Velikost (délka nebo poloměr) [mm]	Označení úseku	Velikost (délka nebo poloměr) [mm]	Označení úseku	Velikost (délka nebo poloměr) [mm]
L ₁	78	L ₉	10	R ₅	1
L ₂	219	L ₁₀	10	R ₆	5
L ₃	78	L ₁₁	7	R ₇	5
L ₄	281	L ₁₂	7	R ₈	1
L ₅	96	R ₁	5	R ₉	5
L ₆	183	R ₂	1	R ₁₀	5
L ₇	96	R ₃	5	R ₁₁	1
L ₈	281	R ₄	5	R ₁₂	5

Dosazení hodnot z tabulky 3.4 a výpočet je proveden v rovnici (3.12).

$$\begin{aligned}
O = & (78 - 5 - 1) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 1\right) + (10 - 1 - 5) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 5\right) + (219 - 5 - 5) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 5\right) + \\
& + (10 - 5 - 1) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 1\right) + (78 - 1 - 5) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 5\right) + (281 - 5 - 5) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 5\right) + \\
& + (96 - 5 - 1) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 1\right) + (7 - 1 - 5) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 5\right) + (183 - 5 - 5) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 5\right) + \\
& + (7 - 5 - 1) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 1\right) + (96 - 1 - 5) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 5\right) + (281 - 5 - 5) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot 5\right) = 1293 \text{ mm}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Výsledný střížný obvod tedy ze vztahu (3.12) vyšel $O = 1293 \text{ mm}$.

3.3.2 Určení tloušťky stříhané desky

Nejvhodnějším řešením určení tloušťky stěny v místě stříhu by byla numerická simulace. Tu však nebylo možné během vypracovávání bakalářské práce udělat. Jednodušší tvary lze řešit početně pomocí zákona zachování objemu. To však u takto komplikovaného tvaru nelze, neboť tloušťka bude velmi proměnlivá. Proto jedinou možností bylo tloušťku stěny stanovit měřením na shodném výrobku, vyrobeném na starším modelu tvarovacího stroje. Výsledky měření v různých místech na střížném obvodu jsou uvedeny v tabulce 3.5.

Použité nástroje: Mikrometr

Tabulka 3.5: Naměřené hodnoty tloušťky stěny výrobku v místě stříhu s_τ

Číslo měření	Tloušťka stěny [mm]	Číslo měření	Tloušťka stěny [mm]
1.	1,17	15.	1,24
2.	0,71	16.	0,97
3.	0,81	17.	1,05
4.	0,90	18.	0,98
5.	0,85	19.	1,00
6.	0,75	20.	0,89
7.	0,76	21.	1,04
8.	0,74	22.	1,00
9.	1,09	23.	1,22
10.	1,14	24.	1,24
11.	0,85	25.	0,72
12.	0,81	26.	0,71
13.	0,81	27.	0,80
14.	1,23	28.	1,13

Pro teoretický propočet síly potřebné na výsek výrobku je vhodné počítat s nejvyššími naměřenými hodnotami, bude tak zajištěno, že síla bude dostatečná i v nepříznivých případech, a je tím zahrnut do výpočtu i jistý koeficient bezpečnosti. Výsledná tloušťka v místě stříhu je tedy pro výpočet zjištěna $s_\tau = 1,24$ mm.

3.3.3 Střihová pevnost

Mez pevnosti ve smyku, neboli střihová pevnost zjištěná z tabulky 2.4 je
 $\tau_s = 41,1$ MPa

3.3.4 Dosazení a výpočet síly

Dosazením hodnot do rovnice (2.10) vznikne vztah (3.13), jehož řešením lze zjistit potřebnou střiznou sílu.

$$F_s = 1293 \cdot 1,24 \cdot 41,1 = 65900 N = 65,9 kN \quad (3.13)$$

Lze předpokládat, že vlivem otupení střizného nástroje dojde časem ke zvýšení střizné síly. Proto výslednou střiznou sílu je lépe uvažovat o 10 až 30 % vyšší. V nejméně příznivém

případě by tak maximální síla dosažená při vystřihávání výrobku z pásu mohla dosáhnout hodnot zhruba $F_s = 65,9 \cdot 1,3 \cong 86 \text{ kN}$. Vzhledem k parametrům výsekové stanice, která je schopná vyvinout sílu až 500 kN, je zřejmé, že stroj je předimenzován a neměl by být problém potřebné síly dosáhnout.

3.4 Technologické parametry pro výrobu

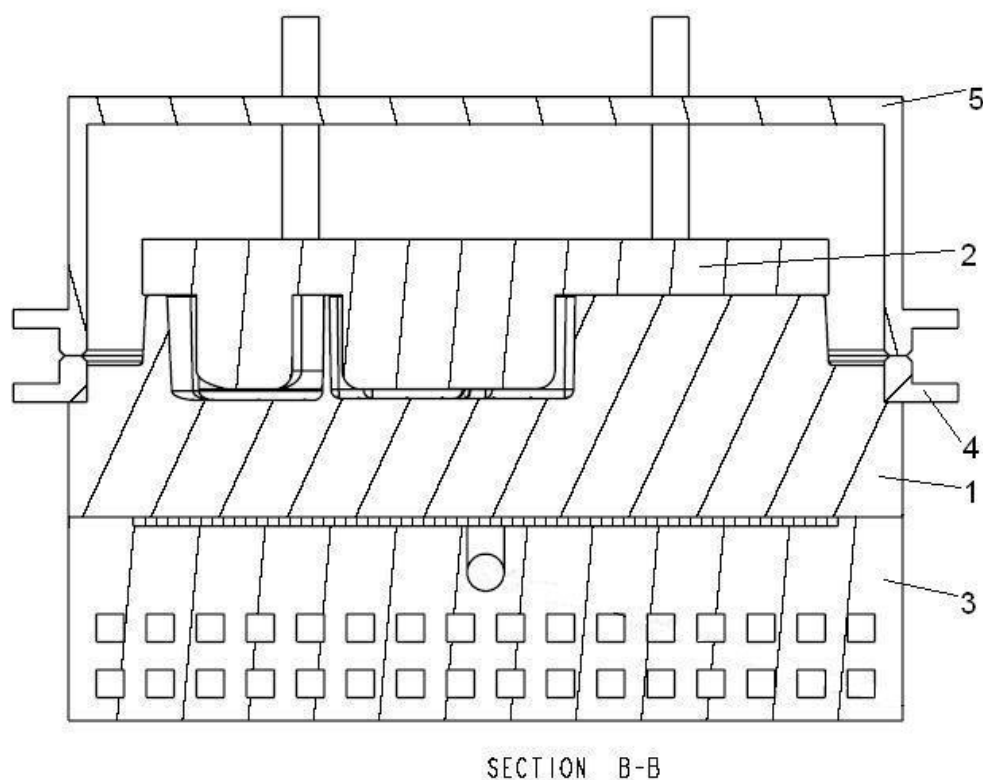
Souhrn vstupních technologických parametrů pro výrobu, které byly buď stanoveny z obvyklých hodnot a tabulek nebo vypočteny, je uveden v tabulce 3.6.

Tabulka 3.6: Vstupní technologické parametry

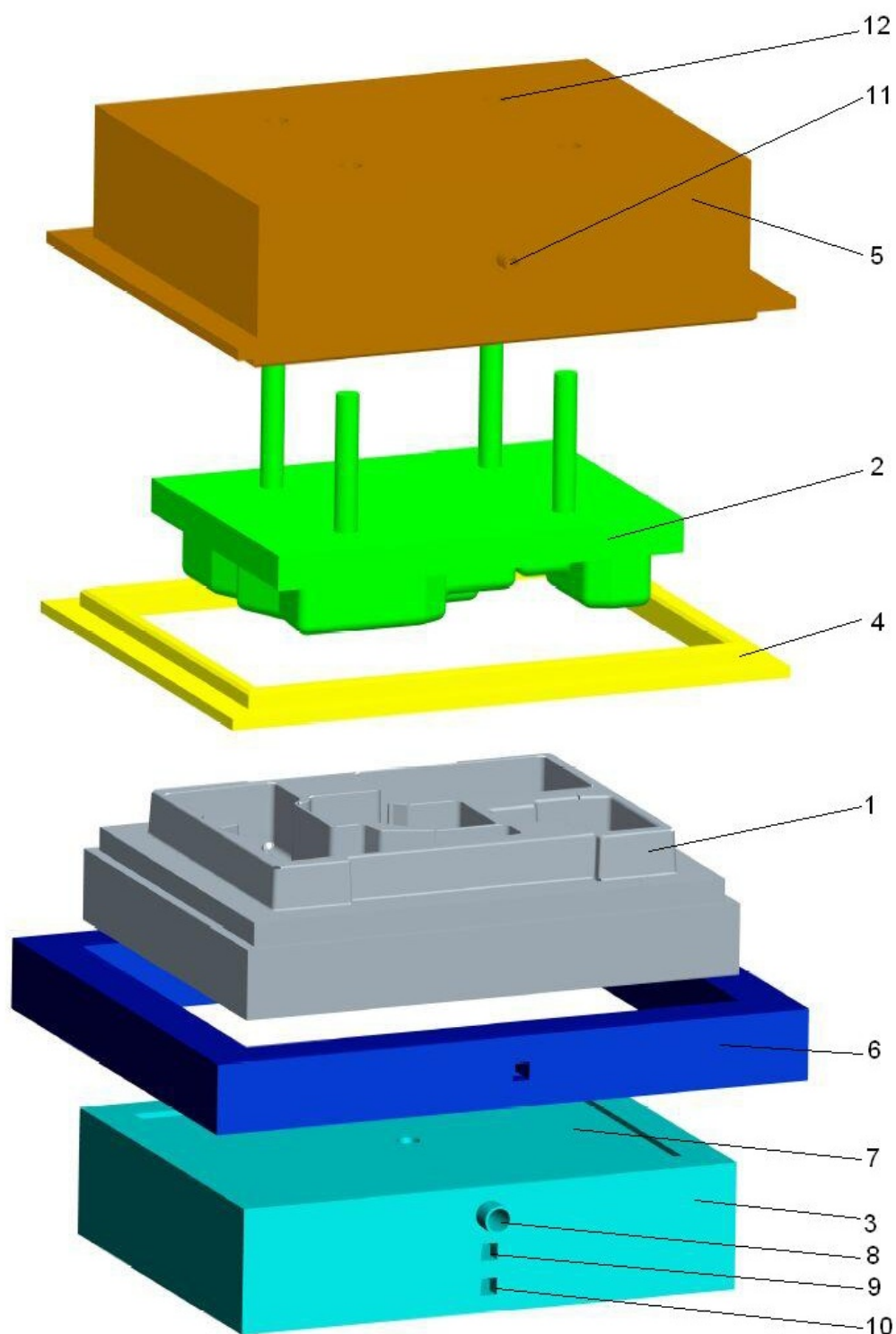
Technologický parametr	Zkratka	Rozměr	Hodnota
Délka výrobního cyklu	t_T	s	6
Tvarovací teplota (teplota materiálu)	T_T	°C	185
Pracovní teplota nástroje	T_N	°C	35
Teplota výrobku při vyndávání z formy	T_V	°C	60
Rozdíl teplot temperačního média na vstupu a výstupu	ΔT_M	°C	4
Průtok temperačního média	\dot{V}	l/min	29,2
Síla pro výsek výrobku	F_s	kN	65,9

3.5 Návrh konstrukce nástrojů

V případě daného výrobku jde o kombinaci pozitivního a negativního pneumatického tvarování. K dokonalému a rychlému vytvarování je vakuum vytvářené na straně styku desky s formou doplněno přetlakem z opačné strany. Nástroj tak musí být vybaven přetlakovou komorou, která je připevněna k hornímu rámu přidržujícímu polotovar. Vzhledem ke složitému tvaru požadovaného výrobku je nutné tvarovat postupně, tedy nejprve předtvarovat. Předtvarování se zajišťuje mechanicky, tedy zajištěním nejprve pozitivní části nástroje do materiálu a dále zasunutím pomocného tvárníku do negativní části formy. Odvod tepla z nástroje je zajištěn nepřímým temperováním, tedy připevněním temperované desky na spodní stranu nástroje a případně temperovaného rámu na svislé vnější stěny formy. Na obrázku 3.7 je vyobrazeno schéma sestaveného tvarovacího nástroje a na obrázku 3.8 je rozpadové schéma 3D modelu stejného nástroje.



Obr. 3.7: Sestavený tvarovací nástroj (bez pomocného temperovaného rámu), 1 – tvarovací forma, 2 – pomocný tvárník, 3 – temperovaná deska, 4 – Spodní přidržovací rám, 5 – přetlaková komora s horním přidržovacím rámem

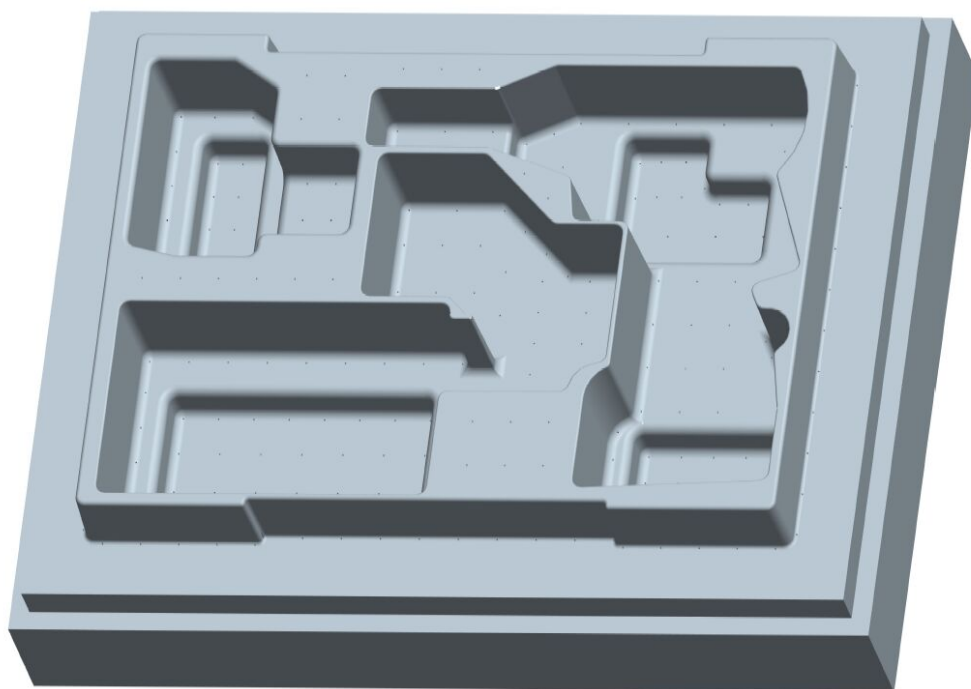


Obr. 3.8: Rozložený tvarovací nástroj, 1 – tvarovací forma, 2 – pomocný tvárník, 3 – temperovaná deska, 4 – spodní přidržovací rám, 5 – přetlaková komora s horním přidržovacím rámem, 6 – pomocný temperovaný rám, 7 – odsávací štěrbin, 8 – přípojka odsávacího potrubí, 9 – vstup temperačního média, 10 – výstup temperačního média, 11 – přípojka přetlakového potrubí, 12 – vedení pomocného tvárníku

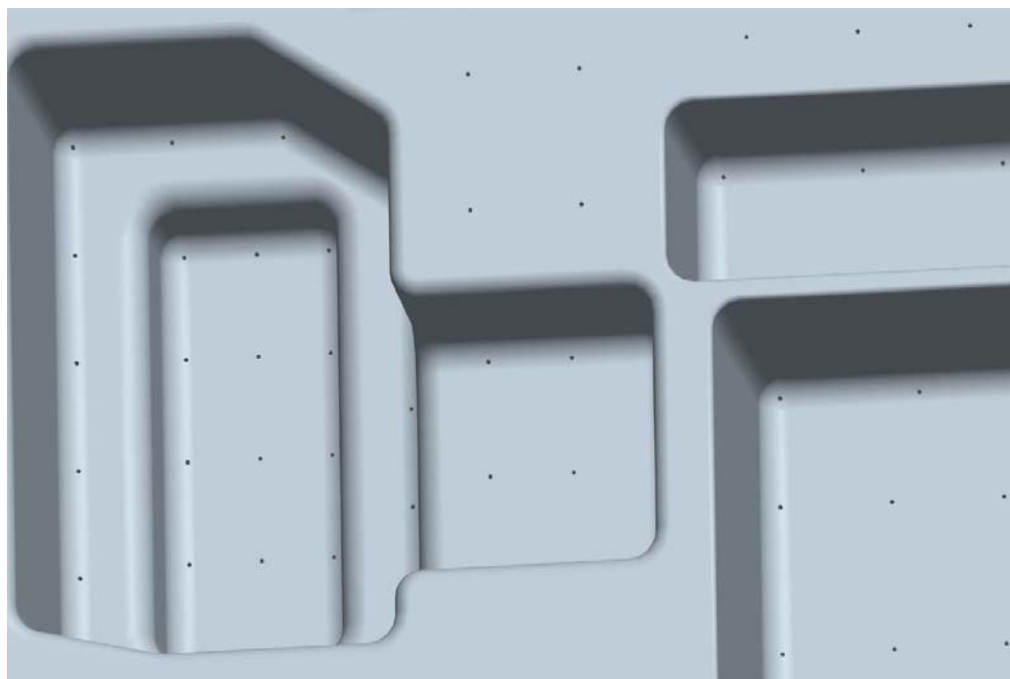
3.5.1 Bližší popis funkčních částí

3.5.1.1 Tvarovací forma

Nejdůležitější částí nástroje je tvarovací forma (obrázek 3.9). V tomto případě se jedná o jednonásobnou formu. Na její konstrukci bude záviset výsledná jakost vyráběných dílů. Musí být zajištěna dobrá tepelná vodivost, aby byl výrobek dostatečně rovnoměrně ochlazen a nedošlo tak k jeho deformaci. To je zajištěno použitým konstrukčním materiálem, kterým je hliník. Dále musí být zajištěn dokonalý a rychlý odvod vzduchu pro vytvoření vakua mezi formou a polotovarem. To závisí na volbě a počtu odsávacích otvorů. Rozměr odsávacích kanálů musí být dostatečně velký, aby zajistil rychlý odvod vzduchu, ale nesmí zanechávat stopy na výrobku. Doporučené rozměry odsávacích kanálů jsou uvedeny v kapitole 2.3.3.4 a pro daný případ je vhodné použít kanály o průměru 0,8 mm. Jejich umístění je nutné zejména do vnitřních hran u dna výrobku, neboť tam dochází k tažení nejpozději. Je však potřeba, ač v menším množství, umisťovat otvory i do větších rovných ploch, kde by jinak mohly být chyceny kapsy vzduchu deformující výsledný výrobek. Pro řešený případ je rozteč odsávacích otvorů po konzultaci s konstruktéry ze zadávající firmy volena mezi 15 mm (pro složité tvary na výrobku) a 25 mm (pro dlouhé rovné hrany a rovinné plochy). Obrázek 3.10 ukazuje detailní pohled na rozložení odsávacích otvorů v části formy. Konstrukce odsávacích otvorů vhodná pro snížení tlakových ztrát je popsána v kapitole 2.3.3.4 a ukázána na obrázku 2.6. Povrch formy se doporučuje pro lepší odvod vzduchu pískovat.



Obr. 3.9: 3D model tvarovací formy



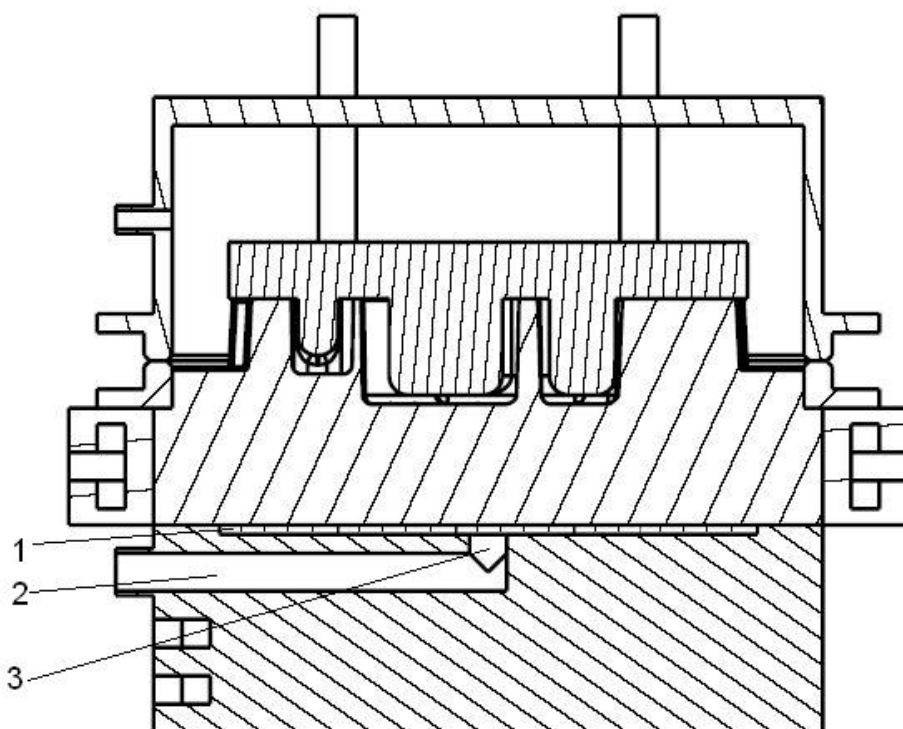
Obr. 3.10: Detailní pohled na rozložení odsávacích otvorů

3.5.1.2 Pomocný tvárník

Princip konstrukce pomocných tvárníků je popsán v kapitole 2.3.4.2. Materiál tvárníku musí vykazovat malou tepelnou vodivost, aby příliš neochlazoval zpracovávaný materiál a umožnil tak jeho tvarování po celé ploše. Pro automatické linky se nejčastěji používají syntetické strukturní pěny, neboť mají velmi malou tepelnou vodivost a zároveň dobrou rozměrovou stabilitu.

3.5.1.3 Temperovaná deska

Konstrukční řešení temperační desky již bylo popsáno výše. Co však ještě nebylo zmíněno, je systém odsávání vzduchu. V návrhu nástroje je vytvořena v temperační desce mezera spojující vývody odsávacích otvorů, jak je možné vidět na obrázku 3.11. To by sice bylo velmi účinné řešení z hlediska odsávání, ale výsledná plocha styku desky s formou by tak byla naprosto nedostačující pro potřebný přestup tepla a účinnost temperačního okruhu by výrazně klesla. V praxi se proto bude propojení jednotlivých otvorů s odsávacím potrubím ústícím ve středu desky řešit sítí kanálků.



Obr. 3.11: Bokorys sestaveného nástroje v řezu, 1 – odsávací mezera, 2 – odsávací otvor ve dně, 3 – odsávací potrubí

3.5.1.4 Přidržovací rámy

Spodní a horní přidržovací rám drží tvarovanou desku, aby nebyla vtažena do nástroje, ale pouze se natahovala. Počáteční poloha spodního rámu musí být proto těsně nad nejvyšším povrchem tvarovací formy a před začátkem zajištění formy do materiálu (tedy mechanického předtvarování) je nezbytné, aby byly oba rámy pevně dosednuty na materiál. Utěsnění je zajištěno zkosením hran po obvodu plochy styku rámu s tvarovanou deskou tak, aby výsledná plocha byla malá. Díky tomu se rámy „zakousnou“ do materiálu a výsledkem je vzduchotěsný spoj. Mezi rámy a formou je pak zapotřebí provést utěsnění vhodným způsobem, například pryžovým těsněním. Horní rám je navíc spojen s přetlakovou komorou. Pokud by to bylo nutné, lze i přidržovací rámy temperovat.

5. Zhodnocení a závěr

V rámci bakalářské práce byla sepsána rozsáhlá teorie týkající se technologie tvarování na automatických tvarovacích strojích, která byla převážně převzata od různých světových autorů z již publikované literatury a doplněna grafickými schématy. Přináší tak ucelený obraz o této technologii, jejích možnostech, výhodách i používaných principech. Lze ji použít jako orientační podklad pro stanovování technologických parametrů výroby a konstrukci jak nástrojů, tak i tvarovaných výrobků.

Dále byly provedeny propočty tepelné bilance tvarovacího nástroje pro stanovenou ideální dobu tvarovacího cyklu. Výsledné spočtené teplo, které zpracovávaný materiál při ochlazování předá nástroji, je možné odvést pomocí navrženého temperačního okruhu při dodržení stanovených podmínek. Bylo ověřeno, že kapacity použitého strojního chladiče temperační kapaliny jsou pro zjištěný výkon dostačující. Dále byl proveden výpočet střižné síly potřebné k oddělení vytvarovaného výrobku od zbytku polotovaru. Výsledek prokázal, že síla je výrazně nižší, než maximální síla dosažitelná danou výsekovou stanicí. Na použitém stroji tedy lze výrobek bez problémů oddělit za použití střižného nástroje s rovnoběžnými noži. Před zahájením výroby daného dílu je vhodné zpracovat nástřihový plán tak, aby se minimalizoval podíl odpadního materiálu.

Na základě provedených výpočtů a stanovených parametrů byl poté vypracován konstrukční ideový návrh sestavy tvarovacích nástrojů potřebných pro výrobu zadaného prokladu. V návrhu byly zohledněny základní požadavky na tvarovací nástroje, tedy zejména bezproblémová vyrobitelnost daného dílu, jeho funkčnost, přijatelná cena nástroje, ale i estetický design vyráběného prokladu. Jednotlivé funkční části nástroje byly popsány a vyobrazeny ve schématické podobě i jako 3D model. Zvláštní pozornost byla věnována rozložení odsávacích otvorů na formě (tvárnici), neboť pro dokonalé vytvarování je nutný dobrý odvod vzduchu ze všech míst formy. Návrh je tedy výchozím podkladem pro konstrukci nástrojů. Před vlastní výrobou je nutné vypracovat kompletní výkresovou dokumentaci, ale to nebylo cílem této bakalářské práce.

Seznam použité literatury

- [1] LENFELD, P.: Technologie II. – 2.část (Zpracování plastů). Liberec : TU v Liberci, 2006. 139 s.
- [2] THRONE, JAMES L.: Thermoforming : With 148 Figures and 110 Tabela. Munich : Hanser Publisher, 1987. 298 s.
- [3] ILLIG, A.: Thermoforming – A Practical Guide. Munich : Hanser Publisher, 2001. 242 s.
- [4] LENFELD, P.: Technologie II. – 1.část (Tváření kovů). Liberec : TU v Liberci, 2005. 110 s.
- [5] Bareš, K. a kolektiv: Lisování. Praha : SNTL, 1971. 542 s.
- [6] KREBS, J.: Hodnocení mechanických vlastností houževnatých termoplastů podle pevnosti ve střihu. Plastické hmoty a kaučuky VII, 1970, č. 4, s od 106 do 109.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřeby TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a license for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date

Signature